

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Posouzení sesuvu levého svahu potoka Dolní Rozpítý v Dolní Bečvě

Landslide Assesment of Left Slope of Stream Dolní Rozpítý
in Dolní Bečva Region

Student:

Bc. Jakub Kahánek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Kahánek**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3607T035 Geotechnika**
Téma: **Posouzení sesuvu levého svahu potoka Dolní Rozpítý v Dolní Bečvě**
Landslide Assessment of Left Slope of Stream Dolní Rozpítý in Dolní Bečva Region
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Geologické a hydrogeologické poměry posuzované lokality
2. Analýza stávajícího stavu sesuvného území, včetně matematického modelu
3. Analýza možných příčin sesuvu a návrh variantních sanačních opatření
4. Modelová analýza navržených variant sanací
5. Porovnání jednotlivých variant sanací
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hulla, J., Turček, P. *Zakladanie stavieb*. Jaga: Bratislava, 1998. ISBN 80-88905-05-2.
2. Vaníček, I., Vaníček, M. *Earth Structures*. Kluwer Academic Publisher Group. ISBN 9781402039638.
3. Coduto, D. *Geotechnical Engineering*. Prentice Hall: New Jersey, 1999. ISBN 0-12-576380-0.
4. Rozsypal, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Jaga: Bratislava, 2001. ISBN 80-88905-44-3.
5. Abramson, L. W. *Slope stabilization and stabilization methods*. John Wiley and Sons, Inc., 1995. ISBN 0-471-10622-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: **29.02.2016**

Datum odevzdání: **30.11.2016**


doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych rád poděkovat své vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Evě Hruběšové, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce a především za trpělivost, vstřícnost a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat také Ing. Martinu Stolárikovi Ph.D. a Ing. Miroslavovi Pinkovi za pomoc při zaměřování svahu v terénu.

Anotace

Diplomová práce se zabývá tématem svahových pohybů a sesuvů. Zmiňuje různé faktory a příčiny, v jejichž důsledku mohou svahové pohyby vzniknout. Nejvlivnější faktory jsou dány klimatickými podmínkami, geologickou a hydrogeologickou stavbou. Ovšem i špatný zásah člověka do horninového prostředí dokáže vyvolat svahovou nestabilitu. Aby nedocházelo k těmto nestabilitám, provádí se různé druhy sanací, které tyto pohyby eliminují a zastavují. Hlavní náplní práce je posouzení konkrétního sesuvu, který se nachází na levém břehu potoka Dolní Rozpítý v Dolní Bečvě. Jsou zde řešeny hlavní příčiny vzniku sesuvu a jeho následná stabilizace pomocí sanačních opatření. Jako návrh sanace je použito přitížení paty svahu v kombinaci s horninovými kotvami. Jednotlivé situace sesuvu a návrhy sanací jsou řešeny pomocí matematických modelů v programu PLAXIS 2D. Výsledky jsou navzájem porovnány a zhodnoceny.

Klíčová slova: Svah, sesuv, sanace, Moravskoslezské Beskydy

Annotation

The topic of this thesis concern the slope movements and landslides. It mentions various factors and causes, which can cause landslides. The most influential factors are due to climatic conditions, geological and hydrogeological structure. However poor human intervention in the geological environment can cause slope instability too. We used various kinds of remediation to avoid these instabilities. Remediations are designed to prevent and stop the landslides. The main topic of this thesis is to assess a particular landslide, located on the left bank of stream Dolní Rozpítý in village Dolní Bečva. There are solved main causes of the landslide and stabilization through remediation measures. As a remediation design I used the load foot of the slope in combination with rock anchors. Individual situations of landslide and remediation designs are solved by using mathematical models in software PLAXIS 2D. The results are compared and evaluated each other.

Keys word: Slope, landslide, remediation, Moravian-Silesian Beskids

Obsah

Seznam použitého značení	9
1. Úvod	10
2. Vznik a příčiny svahového pohybu	12
2.1. Vznik svahového pohybu.....	12
2.2. Faktory, které způsobují svahové pohyby	17
2.2.1. Změna sklonu svahu.....	17
2.2.2. Zvětšení výšky svahu	17
2.2.3. Přetížení násypy, haldami, nebo skládkami	18
2.2.4. Otřesy a vibrace	18
2.2.5. Změna obsahu vody.....	18
2.2.6. Působení podzemní vody.....	18
2.2.7. Činnost mrazu.....	19
2.2.8. Zvětrávání hornin.	19
2.2.9. Změny ve vegetačním pokryvu.	19
2.3. Klasifikace svahových pohybů	20
2.3.1. Ploužení	20
2.3.2. Sesouvání.....	20
2.3.3. Stékání	21
2.3.4. Řícení.....	21
3. Geologické a hydrogeologické poměry posuzované lokality.....	22
3.1. Lokalizace	22
3.2. Geologické poměry	25
3.3. Hydrogeologické poměry	28
4. Analýza stávajícího stavu sesuvného území.....	30
4.1. Příčiny svahového sesuvu	30
4.2. Podklady pro tvorbu matematického modelu	32

4.3.	Modelování stávajícího stavu	35
5.	Sanační opatření	44
5.1.	Druhy sanačních opatření	44
5.1.1.	Úprava tvaru svahu.....	44
5.1.2.	Odvodnění sesuvu	44
5.1.3.	Ochrana svahu před zvětráváním a erozí.....	45
5.1.4.	Technické stabilizační opatření	46
5.1.5.	Zpevňování zemin	46
5.2.	Návrh variantních sanačních opatření posuzovaného svahu	46
5.2.1.	Návrh sanace pomocí horninových kotev, gabionovou stěnou a úpravou sklonu svahu	47
5.2.2.	Návrh sanace pomocí horninových kotev a mikrozáporové stěny	48
6.	Modelová analýza navržených variant sanací	51
6.1.	Návrh sanace pomocí horninových kotev, gabionovou stěnou a úpravou sklonu svahu	51
6.2.	Návrh sanace pomocí horninových kotev a mikrozáporovou stěnou	56
7.	Porovnání jednotlivých variant sanací.....	62
8.	Závěr.....	63
	Seznam použité literatury	65
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek.....	69

Seznam použitého značení

A	plocha
c	soudržnost
c'	výpočtová soudržnost
c''	soudržnost hřebíků (kotev)
c _{ef}	efektivní soudržnost
c _{pův}	původní soudržnost
c _{soudrž}	celková soudržnost oblasti
E	Youngův model pružnosti při zatěžování
E _{def}	Youngův model pružnosti při deformaci
E _{ur}	Youngův model pružnosti při odlehčování
F	plocha působení prostředí, která připadá na jednu kotvu
G5-GC	šterk jílovitý
CHKO	chráněná krajinná oblast
I	poloměr setrvačnosti
MKP	metoda konečných prvků
M _{sf}	stupeň stability
P	výpočtová únosnost kotvy
R4,R5	třídy hornin
SSV	sever-severovýchod
u	celkový posun
γ	objemová hmotnost horniny
γ _{sat}	saturovaná objemová hmotnost horniny
ν	Poissonovo číslo
σ	normálové napětí
τ	smykové napětí
τ _{rel}	relativní smykové napětí
φ	úhel vnitřního tření
φ _{ef}	efektivní úhel vnitřního tření
Ψ	úhel dilatance

1. Úvod

Svahové pohyby a sesuvy jsou nedílnou součástí procesů v krajině. Významně se podílejí na utváření georeliéfu a rázu krajiny. Patří však mezi nejnebezpečnější přírodní i antropogenní jevy, převážně pro svou ničivou sílu a nepředvídatelnost.

Z ekonomického a společenského hlediska jsou svahové nestability závažným problémem, protože v některých oblastech mohou způsobit velké škody. Na některých územích dosahují sesuvy takových rozměrů, že přímo mění krajinu. Současně mohou sesuvy ničit lesní porosty a pozemky, zemědělskou půdu a přitom ztížit její obdělávání. Mohou taky negativně ovlivnit výstavbu komunikací, zejména pak tunelových staveb, kde může dojít ke zdržení realizace, zvýšení stavebního nákladu nebo dokonce přerušení provozu. Dále pak vodohospodářské stavby, přehrady, hospodářské i obytné budovy nebo celá sídliště a tím mnohdy ohrožovat i životy lidí. Obzvláště v minulosti, kdy lidé ještě nebyli se sesuvy natolik seznámeni jako dnes, docházelo k častým katastrofám s velkými škodami na hmotném majetku, občas i na životech. Je tedy nutné věnovat této problematice velkou pozornost.

S otázkou stability svahů se setkáváme v různých odvětvích lidské činnosti, nejčastěji při realizacích související se stavební činností. Člověk často sám způsobuje sesouvání nesprávným zásahem do svahu nebo nevhodným postupem při stavebních pracích. Může se přitom jednat o svah přírodního nebo umělého charakteru, vzniklého různými zásahy do přírodních poměrů.

Vedle povodní řadíme svahové sesuvy mezi hlavní přírodní hazardy v České republice. Na našem území je evidováno řádově na 10 000 sesuvů. V některých oblastech jsou sesuvy poměrně výjimečným jevem, jinde se s nimi můžeme setkat velice často. Nejvíce rizikových sesuvných území se soustřeďuje do mladých vrásných pohoří s pestrými sedimentárními obaly. V tomto ohledu patří Česká republika mezi relativně bezpečné země. Přesto i u nás jsou území, kde riziko sesouvání je výrazně vyšší díky vhodné kombinaci především terénních, geologických a klimatických poměrů. Typickými příklady rizikových sesuvných regionů jsou flyšové Karpaty.

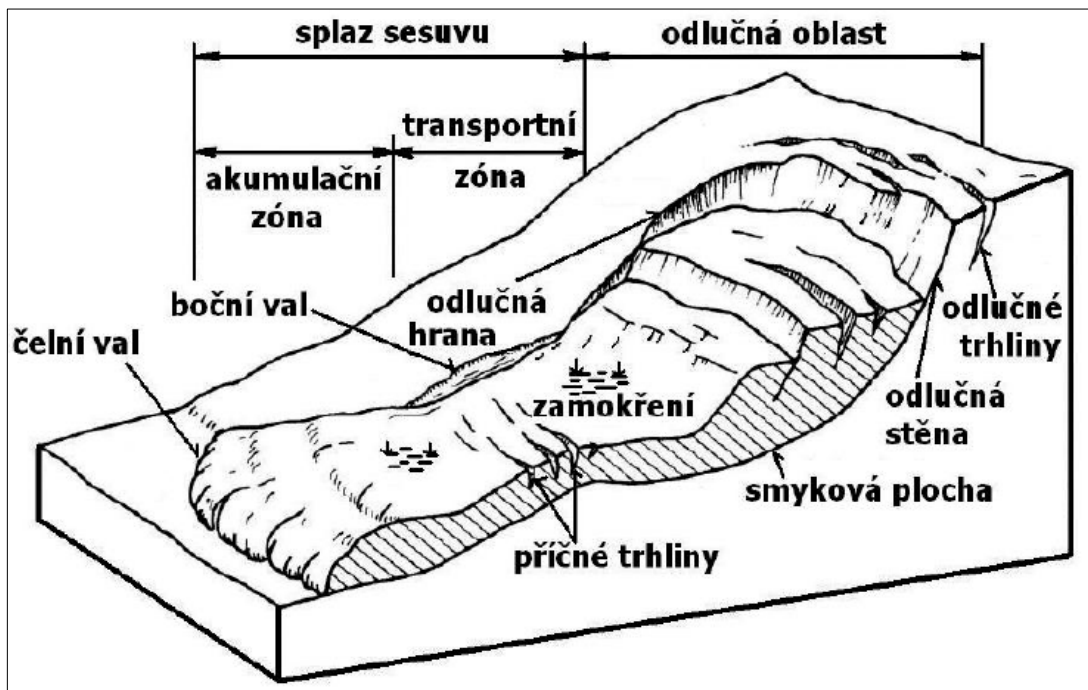
Sesuvy vždy vzbuzovaly zájem široké veřejnosti jako jevy, které nelze spolehlivě předpokládat ani ovládat. I v dnešní době je téměř nemožné přesně předpovědět místa vzniku sesuvů, lze pouze odhadnout nejrizikovější a nejnáchylnější oblasti. Geologové z celého světa proto hledají řešení, jak těmto velkým sesuvům předcházet, nebo je alespoň předpovídat s dostatečným předstihem. Nejjednodušším řešením této problematiky je monitoring sesuvů. [1]

2. Vznik a příčiny svahového pohybu

2.1. Vznik svahového pohybu

Pojmem svahový sesuv se rozumí gravitační pohyb hornin po svahu. Od tohoto druhu pohybu se rozlišuje přemístění hornin po svahu, způsobené transportními médii, jako jsou sníh, voda, led a vítr.

Vznik a vývoj svahových pohybů je podmíněn zejména účinkem gravitačních sil na částice hornin, které tvoří svah. K pohybu svahových hmot dochází, pokud je narušena stabilita svahu. Ta je dána rovnováhou dvou sil působících na svahový materiál. Poměr mezi silami, které se snaží zabránit pohybu (pevnost horniny, tření na vytvářející se smykové ploše) – pasivními silami, a silami, které se snaží uvést svah do pohybu (gravitace, hydrodynamický tlak) – aktivními silami, se nazývá stupeň stability. Z uvedeného vyplývá, že jakmile na svahu převládají účinky aktivních sil, horniny se dají do pohybu, čímž vzniká svahový pohyb. Výslednou formu svahových pohybů jsou svahové poruchy – deformace. [1, 2]



Obrázek 1 – Hlavní části sesuvu [3]

Svahové pohyby se vytvářejí v určitých přírodních podmínkách, které jsou dány klimatickými, hydrogeologickými, geomorfologickými a geologickými poměry. Ty představují základní předpoklady, v rámci kterých se pohyb vytváří nebo. Proto určité podmínky jsou pro vznik svahových sesuvů příznivé nebo nepříznivé.

Klimatické poměry přispívají ke vzniku svahových sesuvů režimem srážek a teplot. Všeobecně platí, že čím je větší vlhko, tím rychleji probíhají procesy degradace vlastností hornin na svahu.

Hydrogeologické poměry, kde patří poměry podzemních vod, úzce souvisí s klimatickými podmínkami. Příznivé podmínky na vznik svahových sesuvů jsou tehdy, když hladina podzemní vody je blízko pod povrchem, místy je napjatá, její spád je po svahu a není možný rychlý odtok povrchové a podzemní vody ze svahu.

Geomorfologické poměry, které jsou příznivé na vznik svahových sesuvů, se vyskytují v případě, kdy tvar svahu má nevyrovnaný podélný profil s proměnným spádem, velkou členitostí a je vcelku konvexně vyklenutý.

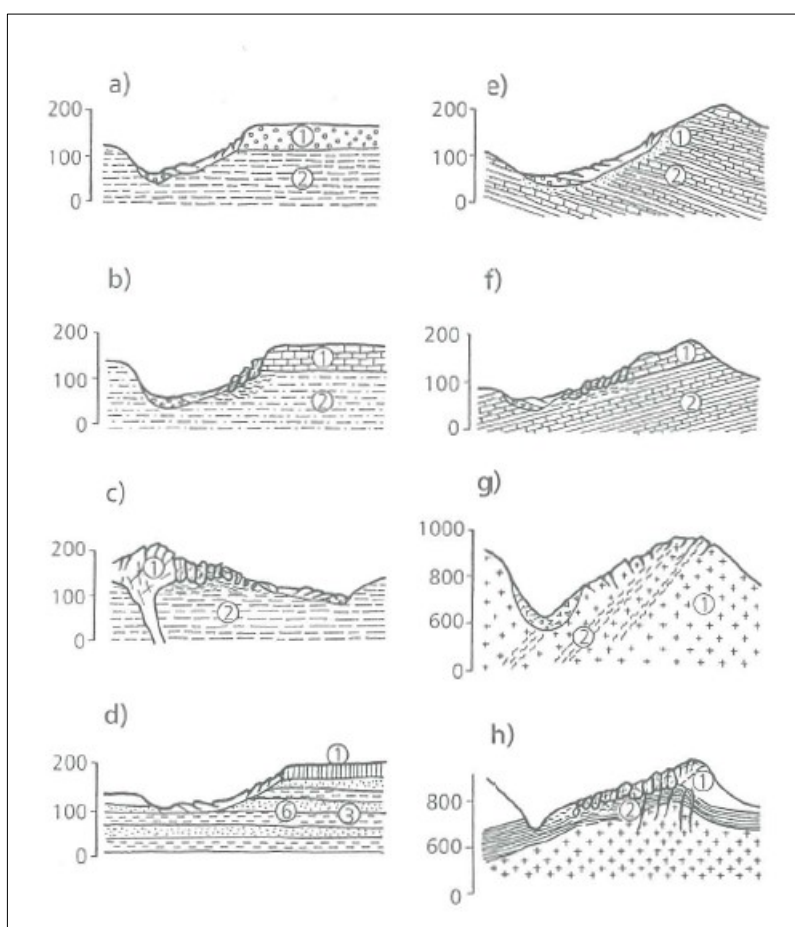
Geologické poměry svahů tvoří určitý sled horninových komplexů s jejich určitým tektonickým porušením, což znamená, že každý svah charakterizuje určitá geologicko-tektonická stavba. Ta ovlivňuje geomorfologické a hydrogeologické poměry daného svahu, a proto je určující podmínkou pro vznik svahových sesuvů.

Svahový sesuv vzniká tehdy, když se na svahu vyskytuje příznivá geologicko-tektonická stavba. V roce 1982 vyčlenil A. Nemčok typy geologicko-tektonických struktur, které se běžně vyskytují na našem území a jsou příznivé pro vznik svahových pohybů (*Obrázek 2*):

- Jestliže svah tvoří horniny, v kterých klesají pevnostní charakteristiky směrem do podloží, podléhá nerovnoměrně erozi. Měkké podloží méně odolává, rozkládá se rychleji než tvrdé, odolné nadloží. Tímto vzniká na svahu nerovnovážený stav. Tvrdé rozpuštěné horniny horní části svahu jsou propustné, podzemní voda se soustřeďuje na povrchu spodního komplexu,

kde rozmáčí zvětraný plášť, který je poté vystavený intenzivním pohybům (Obrázek 2 – a, b, c, f, h).

- Jestliže se na svahu střídají mnohonásobně vrstvy nebo polohy hornin pevnějších a méně odolnějších. Typický příklad je flyš. Tato struktura je náchylná na intenzivní pohyb zejména tam, kde údolí řežou čela vrstev (Obrázek 2 – d, e).
- Jestliže jsou svahy intenzivně porušené. Svahové sesuvy vznikají po tektonických poruchách, zlomech, trhlinách apod. (Obrázek 2 – g). [2]



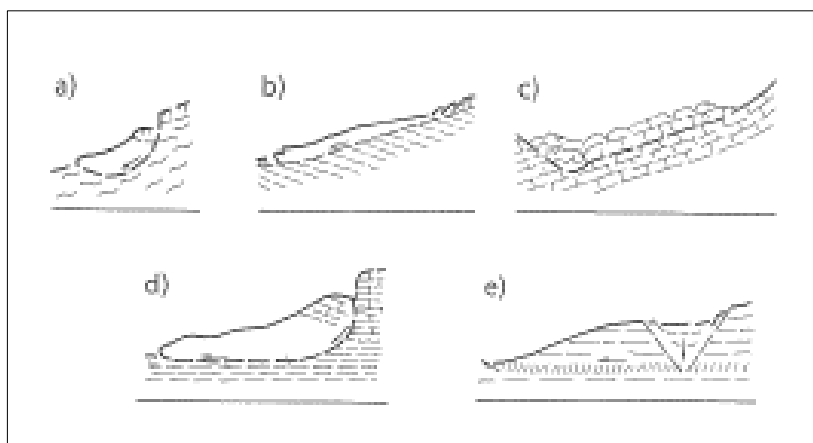
Obrázek 2 – Základní typy geologicko-tektonických struktur [2]

a) štěrky ležící v kotlinách na jílech, b) vodorovně uložené travertiny na plastickém podkladě, c) vulkanické horniny ležící na plastickém podkladě, d) horizontální střídání písků, štěrků a jílu, e) flyšové vrstvy uložené proti sklonu svahu, f) masivní vápence a pískovce uložené na plastické vrstvě, g) tektonicky porušené skalní horniny ve vysokých pohořích, h) rigidní vápence a dolomity chočského příkrovu ležících na plastických členech križňanského příkrovu.

Sesuvné jevy tedy vznikají za různých geologických podmínek a působením mnoha faktorů. Při jejich vývoji je důležitá i funkce času. Některé činitele se mění s časem, takže každý sesuv se postupně vyvíjí. Nejdříve se uplatňují podmínky, které zakládají sesuv, objevují se první známky porušení rovnováhy, vznikají trhliny v horní části svahu, pak nastává vlastní pohyb uvolněných hmot, jejich sunutí a postupné ukládání při úpatí svahu. Nahromaděním sesunutých hmot při úpatí svahu si příroda sama vytváří dočasnou rovnováhu.

Plocha, po které dochází k sesuvu, se nazývá smykovou plochou. Její tvar může mít více podob:

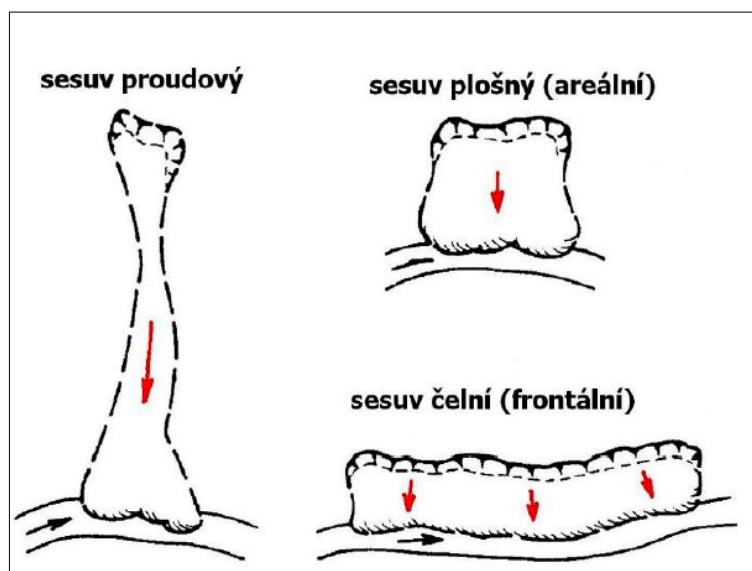
- Rotační smykové plochy mají tvar válce (*Obrázek 3 – a*). Vznikají v homogenních jílovitých zeminách.
- Rovinné smykové plochy mají plošný tvar (*Obrázek 3 – b, c*). Smyková plocha bývá předurčena. Využívá rozhraní mezi podkladem a pokryvnými vrstvami, mezivrstevní plochy nebo tektonické plochy.
- Rotačně-rovinné plochy mají složené, někdy nepravidelné, smykové plochy. (*Obrázek 3 – d*).
- Translační smykové plochy vznikají na horizontálně vytvořené smykové ploše. (*Obrázek 3 – e*).



Obrázek 3 – Druhy smykových ploch [2]

Podle půdorysného tvaru samotného sesuvu, můžeme svahové nestability rozdělit na sesuv proudový, plošný (areální), čelní (frontální) (Obrázek 4). Tvar je především určen svahovým pohybem (ploužením, sesouváním, tečením nebo řícením).

- Plošné sesuvy mají přibližně stejnou délku jako šířku. Vznikají na plochých svazích. Obvykle mívají menší rozměry a hloubku jen několik metrů, výjimečně dosahují tloušťky 10 m.
- Proudové sesuvy mají protáhnutý tvar (délka vícenásobně přesahuje šířku). Dosahují délky až několik kilometrů a tloušťky 30 až 40 m.
- Čelní sesuvy mají větší šířku než délku. Vnikají obvykle na nárazových březích řek vlivem jejich boční eroze.



Obrázek 4 – Půdorysné tvary sesuvů [3]

Podle stupně aktivity dělíme sesuvy na živé (aktivní), dočasně uklidněné (potencionální) a trvale uklidněné (stabilizované). Podle stáří se rozeznávají sesuvy současné a staré sesuvy, z nichž ty, které se za dnešních klimatických a morfologických podmínek nemohou opakovat, se nazývají fosilní.

Současné (většinou aktivní) sesuvy se poznají snadno podle morfologie, protože jejich tvary jsou čerstvé, výrazné, neporušené dešťovým ronem a erozí. Stromy jsou různě vychýlené z původní polohy. Cesty, meze a stromořadí, které vedou přes sesuvné území, jsou přerušené.

Sesuvy dočasně uklidněné bývají zarostlé nebo porušené erozí, takže stopy posledních pohybů nejsou tolik zřetelné. Příčiny vzniku doposud trvají, takže pohyb se může znovu objevit.

Fosilní sesuvy jsou obvykle pleistocenního stáří a starší. Vznikly za klimatických a morfologických podmínek, které se v současné době už nemohou opakovat. [1]

2.2. Faktory, které způsobují svahové pohyby

Faktory svahových pohybů je možno definovat jako procesy změny daných podmínek. Příčiny mohou mít jak přírodní, tak i antropogenní charakter. Každý svah má určitý stupeň stability. Jeho změnu v čase zapříčiňuje působení některého faktoru. Faktor, který se v okamžiku vzniku svahového sesuvu nejvýrazněji uplatnil, se nazývá příčinou svahového pohybu. [1, 2]

Rozmanitost svahových pohybů je určena řadou faktorů, které sesouvání způsobují. Nejdůležitější faktory způsobující vznik svahových pohybů na našem území jsou:

2.2.1. Změna sklonu svahu.

Může být způsobena přirozeně podemletím paty svahu erozní činností vodního toku nebo uměle podkopání svahu. Ke změně sklonu svahu může dojít i tektonicky, a to poklesy nebo zdvihy. Vzrůst sklonu svahu způsobuje v horninách změnu napětí, rovnováha bývá porušena vzrůstem napětí ve smyku.

2.2.2. Zvětšení výšky svahu

Vzniká jako výsledek erozní činnosti nebo výkopových prací. Prohlubování údolí způsobuje uvolňování bočních napětí ve svazích, a to vede ke vzniku puklin rovnoběžných s povrchem svahu, do nichž voda snadněji vniká.

2.2.3. Přetížení násypy, haldami, nebo skládkami

Způsobuje vzrůst smykových napětí a zvětšení napětí vody v pórech jílovitých zemin, které zmenšuje pevnost ve smyku. Přetížení je tím nebezpečnější, čím je rychlejší.

2.2.4. Otřesy a vibrace

Zemětřesením vznikají v horninách kmity různé frekvence, podobně působí i výbuchy velkých náloží trhavin i otřesy strojů. V horninách vznikají tak dočasné změny napětí, které mohou porušit rovnováhu svahu. Dochází ke vzrůstu smykového napětí a v některých případech ke snížení pevnosti ve smyku, což má za následek porušení stability svahu. U spraší a málo zpevněných písků může dojít otřesy k porušení intergranulární vazby, a tím ke zmenšení soudržnosti. U zvodnělého jemného písku a citlivých jílů mohou dát otřesy popud k přemístění nebo pootočení zrn, což může způsobit, že se zeminy stanou tekutými. Ve střední Evropě se však větší zemětřesení v dnešní době téměř nevyskytují.

2.2.5. Změna obsahu vody

a) Vliv atmosférických srážek. Dešťová voda a voda z tajícího sněhu vniká do puklin, kde vyvolává hydrostatický tlak, v zeminách vzrůstá napětí vody v pórech a pevnost ve smyku klesá. Periodicky se opakující sesuvné pohyby se vyskytují právě v létech, kdy jsou neobyčejně vydatné dešťové srážky. Soustavným sledováním záznamů dešťoměrných stanic je možno v krajinách ohrožených periodicky se opakujícími sesuvy předvídat obnovení pohybu a upozornit na nutnost zvýšené bdělosti, jsou-li např. sesuvnými jevy ohroženy veřejné komunikace.

b) V období sucha jílovité zeminy vysychají a smršťují se. Vznikají v nich hluboké trhliny, které zmenšují soudržnost hornin na svazích a umožňují vnikání vody do jílovitých zemin.

2.2.6. Působení podzemní vody

a) Tlak proudící podzemní vody na částice zeminy zhoršuje stabilitu svahu. Rychlé změny hladiny mohou dát popud (např. při březích umělých nádrží) k růstu vodního tlaku v pórech, což může způsobit i náhlé ztekucení písku.

b) Podzemní voda může vyplavit rozpustný tmel, tím se zeslabuje intergranulární vazba, zmenšuje soudržnost a klesá pevnost.

c) Proudící podzemní voda v jemném písku a siltu vyplavuje částice zeminy ze svahu. Touto formou eroze vznikají podzemní dutiny a porušuje se tím stabilita svahu.

d) Napjatá hladiny podzemní vody působí na nepropustné vrstvy v nadloží jako vztlak.

2.2.7. Činnost mrazu.

Mrznutím se zvětšuje objem vody v trhlinách, staré trhliny se rozšiřují a nové se tvoří. V rozpukaných horninách je pak menší soudržnost. V jílovitých a jílovitopísčitých zeminách se tvoří ledové vrstvičky. Při jejich tání se zvětšuje obsah vody v povrchové vrstvě, která rozbídá.

2.2.8. Zvětrávání hornin.

Mechanické a chemické zvětrávání hornin porušuje postupně jejich soudržnost. U mnohých sesuvů nasvědčují některé známky tomu, že dalším faktorem jsou chemické změny hornin (hydratační pochody, výměna iontů v jílech) vzniklé působením prosakující vody. Zvýšená náchylnost k sesouvání se projevuje např. v oblastech, kde se vyskytují glaukonitické pískovce a jíly.

2.2.9. Změny ve vegetačním pokryvu.

Kořeny stromů udržují stabilitu svahu mechanickým působením a přispívají k vysoušení svahu tím, že část podzemní vody spotřebují. Odlesněním svahu se mění vodní režim v povrchových vrstvách. [1]

Z hlediska charakteru působení a trvání se uvedené faktory dělí na dlouhodobé a krátkodobé. Dlouhodobé faktory (např. růst sklonu a výšky svahu, zvětrávání atd.) působí velmi pozvolně, dlouhodobě a vyvolávají nezvratné změny stupně stability. Krátkodobé

faktory probíhají relativně rychle a způsobují zvrtné změny stupně stability. Můžou mít přírodní a antropogenní charakter. [2]

2.3. Klasifikace svahových pohybů

Svahové pohyby lze klasifikovat mnoha způsoby. Nejpoužívanější a nejvhodnější dělení je podle A. Nemčoka, J. Paška a J. Rybáře z roku 1974. Ti rozdělili svahové pohyby podle dvou základních kritérií – mechanismu pohybu a rychlosti pohybu. Podle těchto kritérií se svahové pohyby dělí na čtyři skupiny:

- ploužení
- sesouvání
- stékání
- řícení

2.3.1. Ploužení

Svahový pohyb ploužení představuje z geologického hlediska dlouhodobý, obvykle nezrychlující se pohyb horninových hmot, přičemž jejich hranice je při pevném podloží většinou nezřetelná. Velikost posunu hmot je vzhledem na prostorové rozměry postihnutého horninového masivu zanedbatelná. Proto i výsledné formy ploužení jsou často málo výrazné – gravitačně rozvolněné, roztrhané hřebeny a svahy. Výjimkou jsou tvrdé komplexy ležící na měkkém podloží, které se ploužením rozlámou na morfologicky kontrastní blokové pole. Rychlost pohybu je řádově milimetrech až centimetrech za rok. Jakmile se tento proces výrazně zrychlí, ploužení se mění na sesouvání, stékání nebo řícení. Ploužení je v tomto případě přípravnou fází pro další formy pohybu.

2.3.2. Sesouvání

Sesouvání je relativně rychlý krátkodobý pohyb (metr/den) horninových masivů podél jedné smykové plochy nebo více smykových ploch, které oddělují pohybující se hmoty od pevného podkladu. Výslednou formou – svahovou poruchou vzniklou při sesouvání jsou sesuvy. Ty lze dále rozdělit podle tvaru smykové plochy, plošného tvaru a aktivity.

2.3.3. Stékání

Stékání je rychlý krátkodobý pohyb (m/h, km/h) horninových hmot, které obsahují takové množství vody, že pohyb má charakter tečení. Stékající hmoty jsou ostře oddělené od neporušeného podloží. Nejčastějšími výslednými formami stékání jsou zemní a kamenité (sut'ové) proudy. Poloha proudu bývá předurčena vhodně probíhající brázdou nebo rýhou potoka. Uvolněné hmoty protečou poměrně rychle a ukládají se při úpatí svahu, někdy ve značné vzdálenosti od odlučné oblasti.

2.3.4. Řícení

Řícení je náhlý krátkodobý pohyb (m/s) horninových hmot na strmých svazích. Od sesouvání se liší tím, že rozvolněný materiál provádí alespoň část pohybu volným pádem a také tím, že pohyb nenastává po výrazné smykové ploše. Základní typy svahových poruch skupiny řícení jsou odvalové zřícení a rovinné zřícení. [2]

3. Geologické a hydrogeologické poměry posuzované lokality

3.1. Lokalizace

Posuzovaný svah se nachází v obci Dolní Bečva, okres Vsetín, ve Zlínském kraji, na východě České republiky. Svah leží na levé straně potoka Dolní Rozpítý, který pramení na jižní straně hory Radhošť a vlévá se jako pravý přítok do Rožnovské Bečvy. Tato řešená oblast spadá do pohoří Moravskoslezské Beskydy.

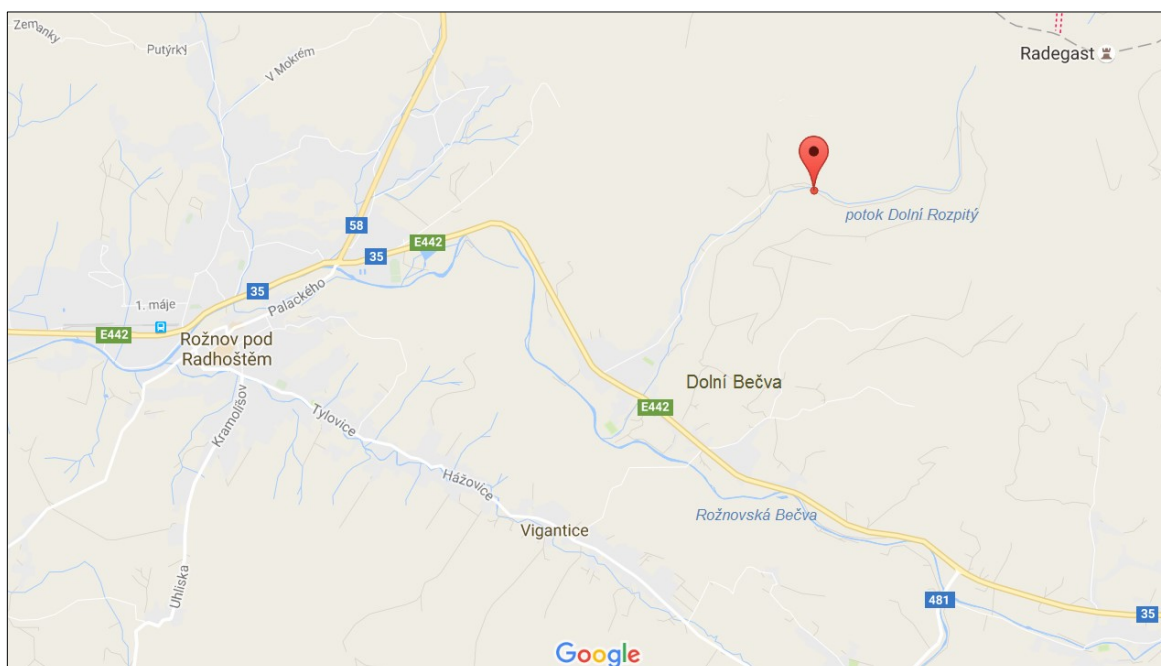
Obec Dolní Bečva je umístěna v malebném prostředí Moravskoslezských Beskyd pod horou Radhošť a rozkládá se na horním toku řeky Bečvy. Je vzdálená 4 km na východ od města Rožnov pod Radhoštěm. Obcí prochází státní silnice I/35 Valašské Meziříčí - Rožnov p/R - Slovenská republika. Na severní hranici katastru leží vrchol Radhoště s nadmořskou výškou 1129 m. Střed obce je položen v nadmořské výšce 427 m n. m. Se svou rozlohou 2006 ha a počtem 1900 obyvatel patří mezi středně velké obce okresu Vsetín. Trvale obydlených domů v obci je cca 670. [4]



Obrázek 5 – Letecký snímek obce Dolní Bečva [4]



Obrázek 6 – Zlínský kraj [5]



Obrázek 7 – Obec Dolní Bečva s vyznačeným posuzovaným svahem [6]

Katastr: Dolní Bečva, Zlínský kraj, okres Vsetín

List mapy 1:25 000: 25-23-09

Souřadnice svahu: WGS -84:

49,471° N, 18,216° E

S-JTSK:

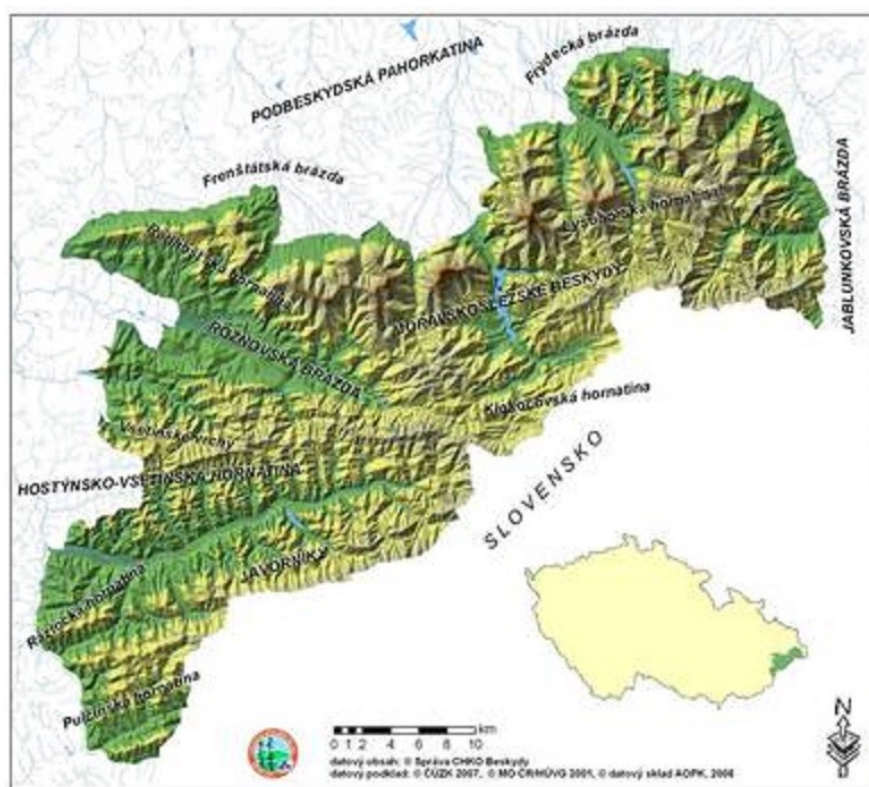
1 141 491 m, 478 875 m

Moravskoslezské Beskydy jsou nejrozsáhlejším pohořím Západních Karpat v České republice. Leží na severovýchodě Moravy, při hranicích se Slovenskem. Jsou naším největším a nejvyšším pohořím karpatského typu s charakteristickým reliéfem. Jsou silně zalesněné a jejich rozloha se rozkládá na území tří okresu – Frýdek-Místek, Nový Jičín a Vsetín. Rozloha Beskyd je 623 km². Členitá hornatina dosahuje délky přibližně 55 km, šířka nepřekračuje 20 km. Hodnota střední výšky je 703,3 m a středního sklonu 14°46'. Pohoří je tvořeno výraznými hřbety, ve střední části i několika izolovanými masivy jako jsou Lysá hora (nejvyšší vrchol Beskyd – 1323 m. n. m.), Travný nebo Smrk. Svahy jsou zde prudké, naopak údolí řek hluboce zaříznuta. Pramení zde přítoky Odry, např. Ostravice a Morávka, dále pak pravostranné přítoky Rožnovské Bečvy. [7, 8, 9]

V severní části se Moravskoslezské Beskydy zvedají do největších výšek Západních Beskyd. Na jižní straně zase pozvolna z vrcholů klesají na území Slovenska, do údolí Kysuce, která je odděluje od Javorníků. Na východě jsou ukončeny prudkým svahem do Jablunkovské brázdy a na jihozápadě také prudkými svahy do Rožnovské brázdy. Na severozápadě je ohraničuje Frenštátská brázda a na severovýchodě Třinecká brázda.

Celé pohoří je součástí Vnějších Západních Karpat, geomorfologické oblasti Západní Beskydy. Z hlediska geomorfologického celku Moravskoslezských Beskyd jsou vymezeny tři geomorfologické podcelky: Radhošťská hornatina, Lysohorská hornatina a Klokočovská hornatina. [9, 10]

Na území Moravskoslezských Beskyd se rozprostírá CHKO Beskydy. Ta zasahuje i do sousedních geomorfologických celků jako jsou Vsetínské vrchy a Javorníky. CHKO Beskydy je se svou rozlohou 1160 km² největší v ČR. Předmětem ochrany Beskyd jsou jejich přírodní hodnoty, především zbytky původních pralesových lesů, výskyt vzácných karpatských živočichů a rostlin. Významné jsou také druhově pestré louky a pastviny. Dále se zde nacházejí povrchové i podzemní pseudokrasové tvary. [7, 8, 9]



Obrázek 8 – Geomorfologie CHKO Beskydy [10]

3.2. Geologické poměry

Moravskoslezské Beskydy jsou součástí flyšového pásma Západních Karpat, které lze zařadit do soustavy geologicky mladých pásemných pohoří, vznikajících koncem druhohor a ve třetihorách působením několika fází alpinského vrásnění.

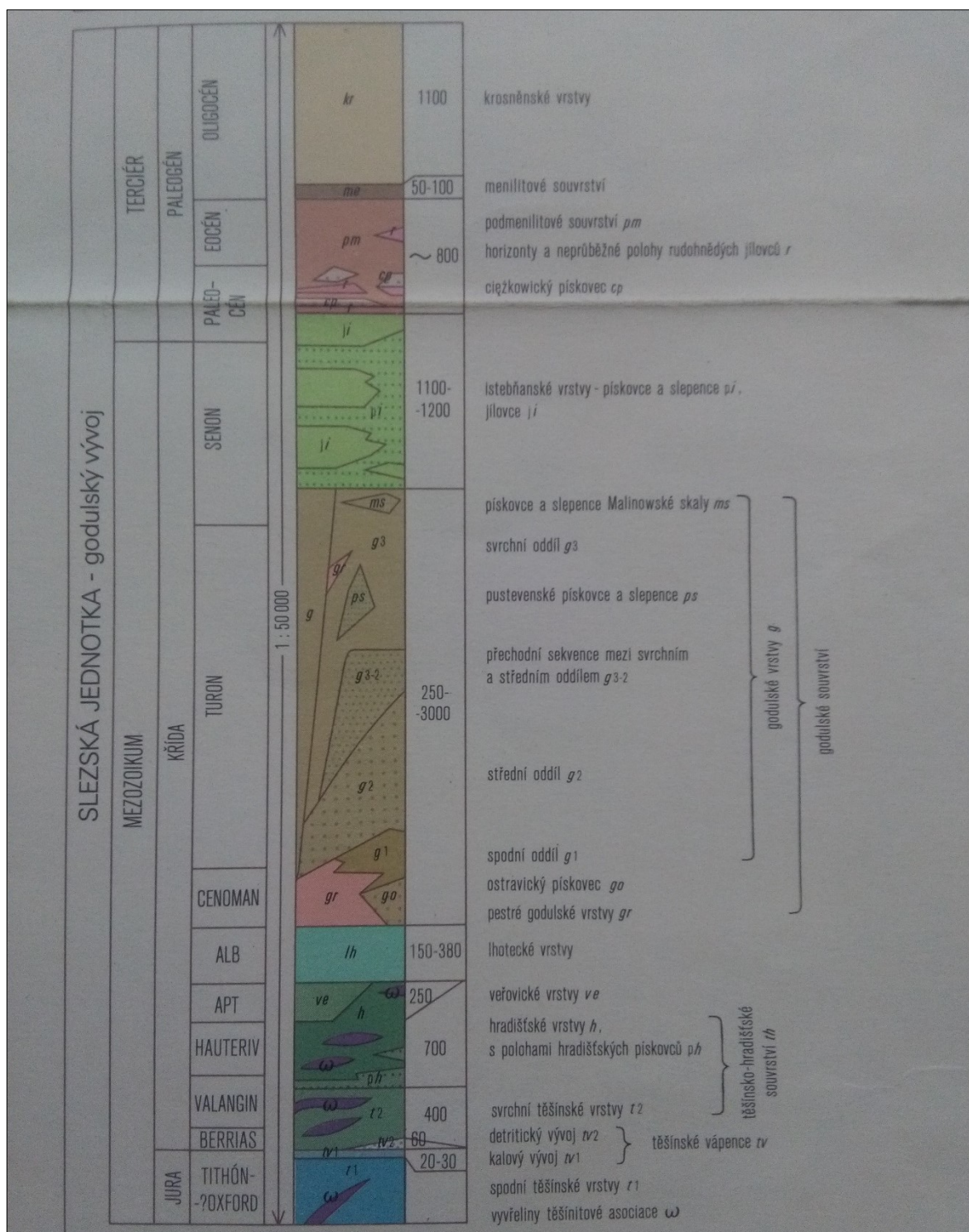
Karpatská soustava se dělí na několik pásem, ale na popisovanou oblast zasahuje pouze pásmo flyšové – vnější. Pod pojmem flyš se v geologii rozumí mnohonásobně rytmické střídání vrstev, v tomto případě jílovců a pískovců. Mocnosti rytů jsou velmi proměnlivé, od několika centimetrů až do několika desítek metrů.

Pro karpatský flyš je také charakteristická příkrovová stavba. Vrásněné hmoty flyšových usazenin vytvořily velké příkrovy, které byly sunuty přes sebe, převážně severním směrem. Po dokončení příkrovové stavby se uplatňovaly hlavně pohyby podél zlomů. K vyzdvihovým pohybům dochází i ve čtvrtohorách. [11, 12]

V popisované oblasti se vyskytují souvrství příkrovu podslezského, slezského a magurského. Nejstarším příkrovem je příkrov podslezský, který ale na území chráněné krajinné oblasti Beskydy chybí. Je převážně vyvinut na pravém břehu řeky Moravy. Přes něj se přesunul mocnější příkrov slezský, který společně s podslezským příkrovem byl hrnut nejmladším příkrovem magurským. Horniny slezského a magurského příkrovu tvoří celé území chráněné krajinné oblasti Beskydy. Příkrov magurský se nachází v jižní polovině oblasti, což jsou všechny hornatiny jižně od Moravskoslezských Beskyd, konkrétně Vsetínské vrchy, Javorníky nebo Slovenské Beskydy. [11, 12]

Pohoří Moravskoslezských Beskyd je tedy tvořeno převážně příkrovem slezským. Ten se vyznačuje dvěma odlišnými vývoji – godulským a bašským. K hlavnímu vývoji slezské jednotky na tomto území patří godulský vývoj s kompletním sledem vrstev a maximálním nahromaděním sedimentů. Vrstvy bašského vývoje jsou v dnešní geologické stavbě slezské jednotky prostorově značně omezeny.

Vrstevní sled godulského vývoje, v rozpětí od svrchní jury do oligocénu, tvoří následující souvrství od nejstarších počínaje: spodní těšínské vrstvy, těšínské vápence těšínsko – hradišťské souvrství, veřovické vrstvy, lhotecké vrstvy, godulské souvrství, istebňanské vrstvy, podmenilitové, menilitové souvrství a krosněnské vrstvy. Z uvedených se svou rozlohou, mocností a vazbou na terénní tvary nejvíce projevují především vrstvy godulské a poté istebňanské. Godulské souvrství je složeno převážně z velmi odolných vrstev a jejímu rozšíření odpovídá pásmo nejvyšší hornatiny Moravskoslezských Beskyd. Místy až 2000 m mocné souvrství odolných pískovců. Ve východní části se od tohoto bloku oddělily masy dílčího příkrovu těšínského. Istebňanské vrstvy ukončují vrstevní řadu křídových usazenin. Střídají se v nich polohy pískovců a méně odolných jílovců. Lemují z jihu oblast godulských pískovců a tvoří celé zadní pásmo hornatiny Moravskoslezských Beskyd. [11, 12, 13]



Obrázek 9 – Statigrafické schéma vrstevního sledu Slezské jednotky – Godulský vývoj [14]

Mocnost flyšových hornin se snižuje v severovýchodně - jihozápadním směru, přičemž dochází k většímu provrásnění hornin a úklonu souvrství k jihu. Vrstvy flyšových hornin jsou překryty kvartérními sedimenty. Moravskoslezské Beskydy charakterizují rozsáhlé a zachované svahové, deluviální sedimenty. Fluviální nánosy a ostatní typy kvartérních sedimentů jsou vyvinuty jen v malých mocnostech. Vznik deluviálních sedimentů připadá na období pleistocénu až holocénu. Podle skalního podkladu mají podobu kamenitých sutí, hlinito-kamenitých a písčito-kamenitých sedimentů. Dosahují nepravidelných mocností. Uplatňuje se u nich právě svahová a gravitační činnost. [8, 9, 13]

3.3. Hydrogeologické poměry

Dalším charakteristickým znakem tohoto území je říční síť a její utváření. Nacházejí se tady divočejší šterkonosné toky, které na sebe vážou mizející druhy rostlin a živočichů, což je ojedinělé v rámci celé republiky. Celá oblast se překrývá s chráněnou oblastí přirozené akumulace vod a patří mezi vydatné a kvalitní zásobárny pitné vody v České republice.

Přibližně středem území probíhá ve směru od východu na západ hlavní evropské rozvodí. Toky severně od linie Veřovické vrchy - Radhošť - Čertův Mlýn - Martiňák - Bumbálka - Velký Polom - Jablunkovský průsmyk náleží do povodí řeky Odry a tedy úmoří Baltského moře a toky jižně od této linie patří do povodí Dunaje a úmoří Černého moře. Obě území jsou rozlohou přibližně stejně velká.

K pravým přítokům řeky Odry patří například Lubina, Ostravice a Olše. Ostravice vzniká v Zadních horách soutokem Bílé a Černé Ostravice, jejími přítoky až po Frýdlant n. O. jsou prudké a krátké potoky. Největším přítokem Ostravice je Morávka, která odvodňuje oblast mezi masivem Lysé hory, hraničním hřebenem a hřebenem Ropice. Severovýchodní svahy Moravskoslezských Beskyd odvodňuje několik větších přítoků Olše, například Lomná, Tyrka, Kopytná a Stonávka.

Jižní svahy Radhošťské hornatiny a jižněji položené hřebety Vsetínských vrchů a Javorníků patří již do úmoří Černého moře. Celá oblast je odvodňována Bečvou, která vzniká soutokem Rožnovské a Vsetínské Bečvy již mimo oblast CHKO Beskydy.

Vsetínská Bečva je delší a jejím největším přítokem je Senice. Kratší Rožnovská Bečva protéká Rožnovskou brázdou a odděluje Vsetínské vrchy od Moravskoslezských Beskyd.

Všechny toky na území obce Dolní Bečva jsou horské potoky, které se snadno rozvodní a několikanásobně tak výši svůj průtok během krátké doby. Roční úhrny srážek zde překračují 600 mm a v Beskydech i 1200 mm.

Oblast Moravskoslezských Beskyd je relativně chudá na podzemní vody, jelikož se zde vyskytují téměř nepropustné horniny. Jsou omezeny flyšovým charakterem souvrství – díky vysokému a opakovanému výskytu pelitických vložek. Proto nemají dobré podmínky pro oběh podzemních vod. Členitost povrchu reliéfu je příčinou výškové stupňovitosti fyzicko-geografických podmínek, které podmiňují také režim podzemních vod. Vliv nadmořské výšky se projevuje především rozdíly v klimatických podmínkách pro doplňování zásob podzemních vod. Zatímco v nižších nadmořských výškách, rovinách akumulčního rázu, kotlinách, brázdách a níže položených plochých pahorkatinách jsou příznivé podmínky pro doplňování zásob podzemních vod po celý rok, ve vyšších polohách dochází zpravidla v zimním období k přerušení doplňování těchto zásob. Příčinou tohoto přerušení je to, že v nadmořských výškách nad 300 až 400 m leží po větší část zimy sněhová pokrývka, v níž se hromadí zásoby vody. Současně dochází na určitou dobu k zamrzání svrchní půdní vrstvy.

Kromě sezonního doplňování podzemních vod se projevuje výšková stupňovitost také částečně i v ročním průběhu měsíčních průměrných stavů hladin podzemních vod a vydatnosti pramenů. Na větší části území se s přibývajícím nadmořskou výškou posunují největší měsíční průměry z března a dubna na květen až červen, případně až červenec. Tento jev je možné pozorovat právě na území Vnějších Západních Karpat.

Zvláštním druhem podzemních vod jsou minerální vody. V Beskydech se vyskytují lokality sirovodíkových pramenů, které jsou málo významné a nevyužívané.

Na území Moravskoslezských Beskyd se nachází několik vodních nádrží. Menší, například Horní Bečva a Bystřička, sloužily původně pro zadržování vod, dnes jsou využívány jako rekreační plochy. Zdrojem pitné i užitkové vody jsou vodárenské nádrže Morávka, Šance a Stanovnice (Karolinka). [4, 15, 16]

4. Analýza stávajícího stavu sesuvného území

4.1. Příčiny svahového sesuvu



Obrázek 10 – Fotografie řešeného sesunutého svahu [Foto autor]

Ke svahovému sesuvu došlo na zájmové lokalitě už v roce 2013, během měsíců únor – březen. Hlavní příčinou sesuvu bylo odstranění vegetace zalesněného svahu, která dodávala danému svahu příslušnou stabilitu. Kořenový systém rostlin přestal fungovat a voda ve svahu se neměla kde udržovat. Nepřispělo tomu ani jarní období, kdy dochází ke zvýšeným srážkám a tání sněhu. Z archivních údajů Českého hydrometeorologického ústavu byl v tomto období ve Zlínském kraji nadprůměrný výskyt srážek oproti dlouhodobému normálu až o 35 %. [17]

V důsledku těchto příčin se aktivoval sesuv o rozloze 55 x 22 m, který je lokalizovaný spíše až v dolní části svahu. Nachází se v extravilánu obce Dolní Bečva, v lokalitě zvané Dolní Rozpítý, na levém břehu stejnojmenného potoka. Pod zájmovým

sesuvem vede místní komunikace nižší třídy s asfaltovým povrchem, která slouží k obsluze lesní správy. V úrovni potoka je provedena gabionová zeď výšky cca 3 m a tloušťky 1 m, která zajišťuje stabilitu dané komunikace a svahu. Další svahový pohyb by mohl znamenat uzavření komunikace a zavalení koryta potoku.

Transportní zóna sesuvu je poměrně výrazná a z části zaplněná sesutými materiály, akumulční zóna tolik zřetelná není. Sesunutý materiál byl přesunut. Sesuv se v současné době jeví jako ustálený a vyznačuje se lokálními odpady horniny.

*Obrázek 11 – Místní komunikace v patě sesuvu
[Foto autor]*

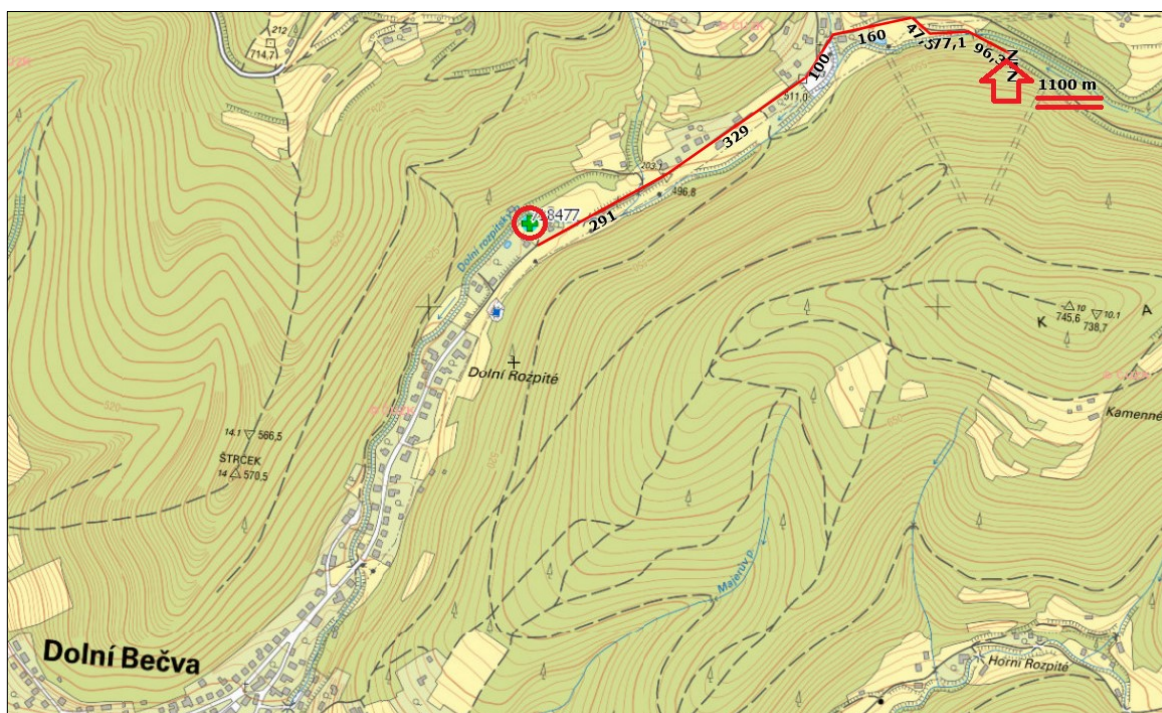


*Obrázek 12 – Gabionová zeď v úrovni potoka Dolní Rozpítý
[Foto autor]*



4.2. Podklady pro tvorbu matematického modelu

Geologická stavba byla odvozena z poznatků rekognoskace předmětného území a studia archivních materiálů. Při hledání prozkoumatelnosti dané oblasti jsem s pomocí České geologické služby a oddělení datových služeb vyhledal nejbližše provedené vrtné průzkumy. Nejbližše provedený vrt se však nenachází v bezprostřední blízkosti řešeného sesuvu. Leží od zájmového svahu zhruba jeden kilometr (1100 m) jihozápadním směrem po proudu potoka Dolní Rozpítý (Obrázek 13 a 14). Ovšem jako přibližná informace o skladbě podloží v oblasti je použita. Dále byla geologie konzultována s odborníkem z praxe, který má s touto lokalitou zkušenosti.



Obrázek 13 – Vzdálenost nejbližšího vrtu od řešeného svahu
[18 – aplikace: vrtná prozkoumatelnost]

STRATIGRAFICKÝ VYMEZENÝ VÝPIS GEOLOGICKÉ DOKUMENTACE ARCHIVNÍHO VRTU
KV-1 [Dolní Bečva]

Klíč báze GDO : 718477 Číslo posudku : P133801 Mapy 1:25.000 25-232 M-34-85-C-b
Souřadnice - X : 1141839.00 Y : 479801.00 [digitalizováno z mapy 1:2000]
Nadmořská výška : 485.00 [nezaměřeno (odečteno z mapy)] Rok ukončení : 2011
Hloubka / délka : 16.00 [vrt svislý] Datum výpisu : 23.6.2016
Účel objektu : hydrogeologický
Realizace : Mgr. Kamil Kurka - ARTES, Opava
Komentář :

stratigrafie
hloubkový interval : základní popis polohy
[m] : rozšíření popisu polohy
komentář k poloze

Kvartér
0.00 - 2.00 : **sut'** hlinitá
Křída - campan až paleogén - dán
2.00 - 16.00 : **pískovec**

ZJIŠTĚNÉ LITOSTRATIGRAFICKÉ JEDNOTKY
2.00 - 16.00 : Istebské souvrství

ZJIŠTĚNÉ REGIONÁLNĚ GEOLOGICKÉ JEDNOTKY
2.00 - 16.00 : Godulský vývoj

Hladina podzemní vody - hloubka [m] : 2.60 **druh hladiny :** ustálená

Provedené zkoušky
objekt vystrojen, hydrogeologické zkoušky a měření

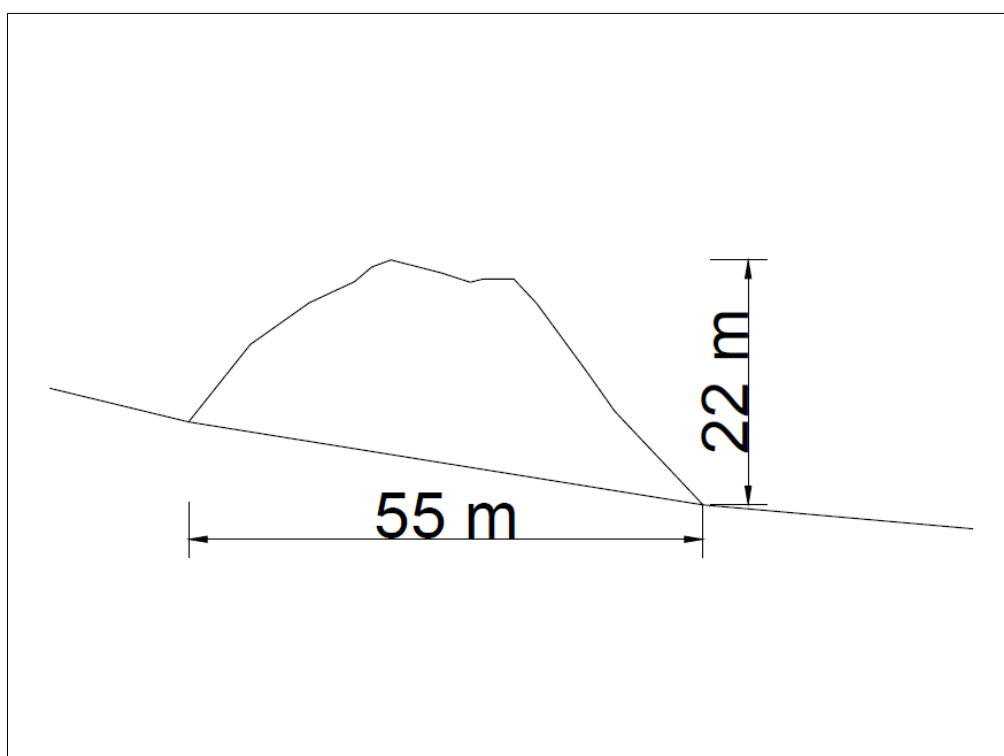
Obrázek 14 – Výpis geologické dokumentace objektu KV-1(718477) [Zdroj: ČGS]

Svah je exponován pod hlavním sklonem cca 40° k SSV. Geologická skladba předmětného svahu je tvořena do hloubky cca 2 m od terénu svahovými sedimenty štěrkovitého charakteru, konkrétně se jedná o středně uhlé štěrky jílovité, třídy G5 (*symbol GC*). Od hloubky 2 m začíná vrstva pískovce. Do hloubky 5 m se vyskytují velmi slabě zpevněné pískovce třídy R5, následovány méně tvrdým pískovcem třídy R4. jednotlivé vrstvy jsou ukloněny pod stejným sklonem jako svah. Tyto parametry horninového prostředí jsou použity jako vstupní hodnoty do matematického modelu. Hodnoty jsou určeny pomocí směrných normových charakteristik (*Tabulka I*). [19, 20, 21]

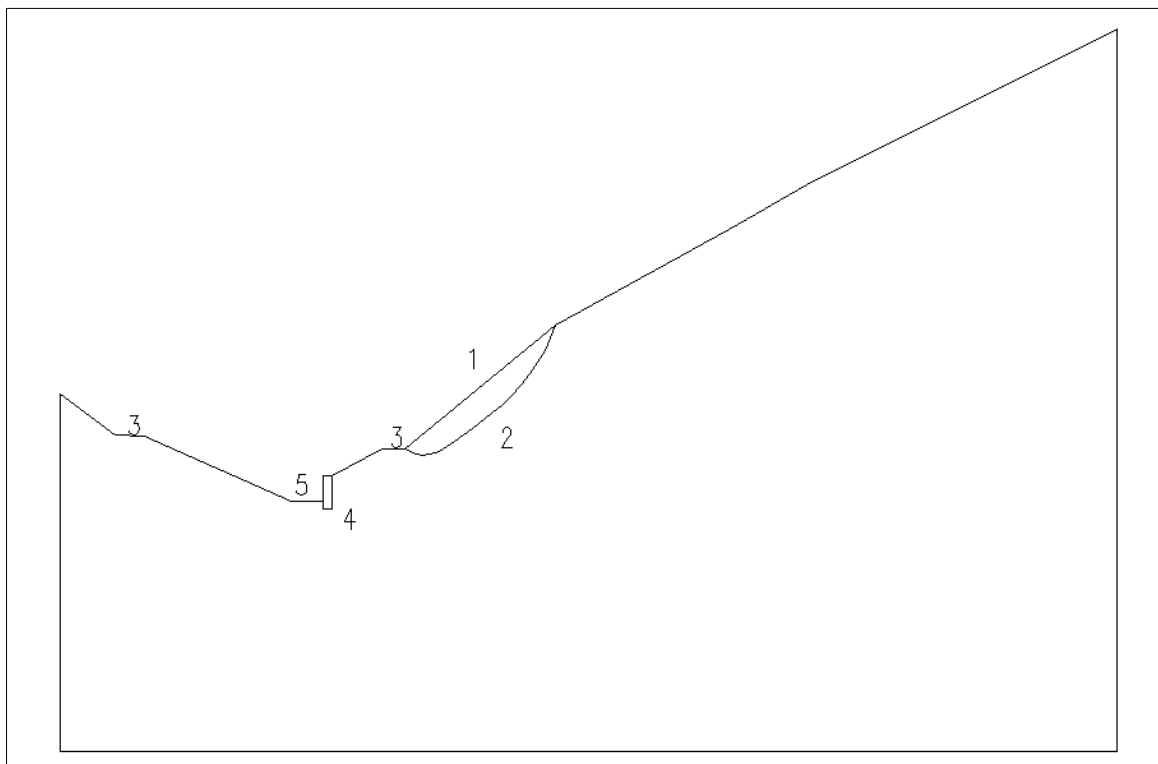
Tabulka 1 – Parametry horninového prostředí dle směrných normových charakteristik

Typ zeminy/horniny	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [MPa]	ν [-]	c [kPa]	φ [°]	$k_x=k_y$ [m/den]	σ_c [MPa]
G5 - GC	19,5	21,5	40	0,3	10	28	0,864	-
Pískovec R5	22	24	30	0,25	16	23	86,4	1,5 – 5
Pískovec R4	24	26	100	0,25	30	24	86,4	5 – 15
Gabionová zeď	26	28	65	0,2	-	-	86,4	-

Pod odborným dohledem bylo provedeno geodetické zaměření svahu v terénu pomocí totální stanice. Zaměřoval se nejen konkrétně řešený obrys a profil sesuvu, ale i jeho širší okolí v návaznosti na zájmový objekt. Zaměřování probíhalo bez větších komplikací. Nejnáročnější byl asi přístup k potoku a pohyb na svahu. Vše se ale zvládlo bez problému. Z naměřených hodnot byl vytvořen obrys sesuvu (Obrázek 15) a příčný řez svahu (Obrázek 16).



Obrázek 15 – Zaměřený obrys sesuvu



Obrázek 16 – Příčný profil zájmového svahu

*1 – původní sklon svahu, 2 – odtržená hrana sesuvu, 3 – místní komunikace,
4 – stabilizační gabionová zeď, 5 – koryto potoku Dolní Rozpítý*

4.3. Modelování stávajícího stavu

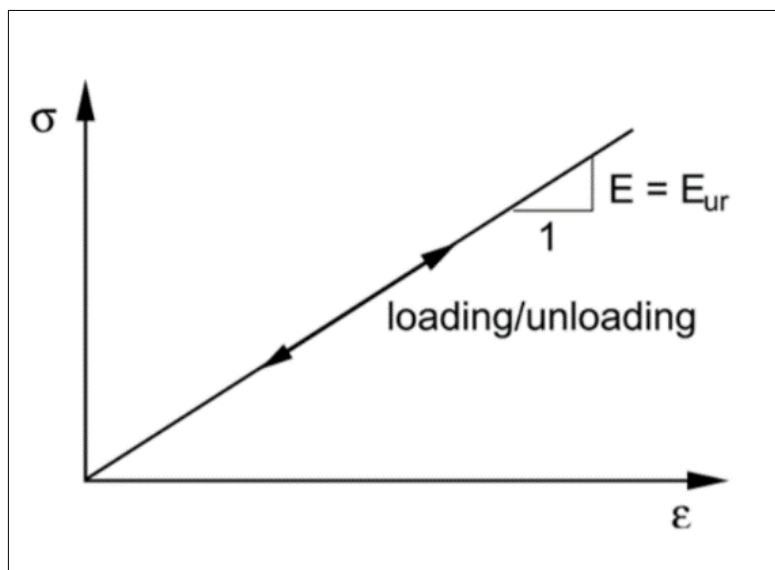
Hlavní náplní diplomové práce je posouzení stability zájmového svahového sesuvu. Posouzení je provedeno pomocí matematického modelování v softwaru PLAXIS. Tento výpočetní systém se používá pro výpočty rovinných i prostorových geotechnických konstrukcí deformační variantou metody konečných prvků. PLAXIS 2D je modul zaměřený na 2D analýzu napěťodeformačního a stabilitního stavu geotechnických konstrukcí.

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, která slouží k simulaci průběhu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků. Zjišťované parametry jsou určovány

v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených konstrukcí, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce. [22, 23]

Důležitou částí modelování je volba konstitutivního materiálového modelu, který popisuje chování materiálu, udává obecně vztah mezi deformací (přetvořením) materiálu a jeho stavovými veličinami. Při provádění modelu řešeného svahu byly použité modely lineárně pružný (linear elastic) a pružně ideálně-plastický (Mohr – Coulomb).

Lineárně elastický model je konstitutivní model, který je založený na Hookově zákoně. Udává vztah mezi napětím a přetvořením, přičemž přetvoření jsou vratná (elastická). Model závisí pouze na dvou materiálových parametrech (Youngův modul pružnosti - E a Poissonovo číslo - ν), moduly při zatěžování E a odlehčování E_{ur} jsou identické. Patří mezi nejjednodušší konstitutivní modely a dobře simuluje chování zemin při velmi malých přetvořeních. Chování zemin při větších přetvořeních nevystihuje zcela přesně. Neumožňuje vyhodnotit porušení, protože nedefinuje žádnou podmínku pro plastické chování. Využívá se často pro modelování konstrukčních betonových nebo ocelových částí modelu.

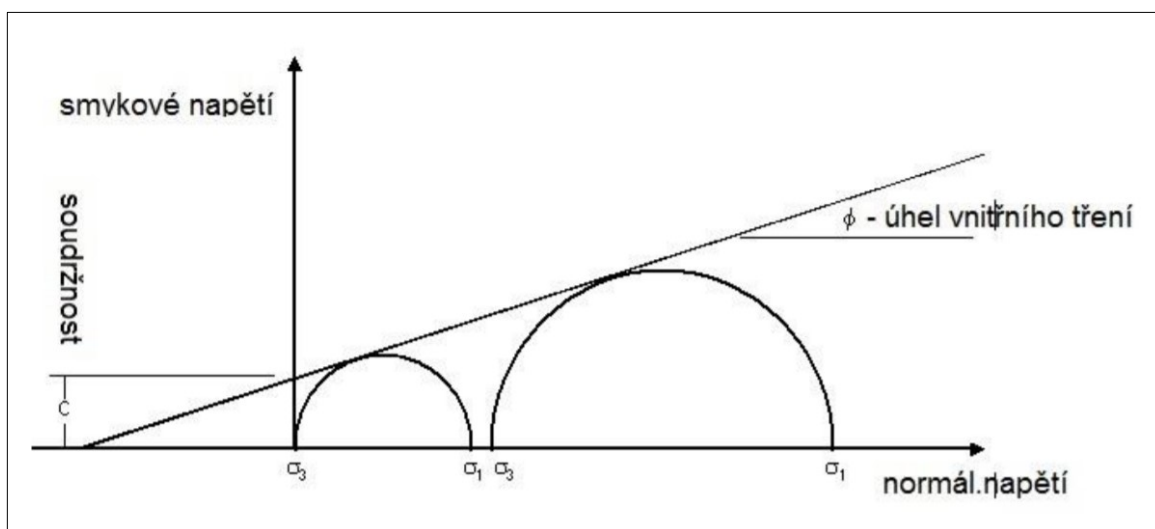


Obrázek 17 – Hookův zákon (Lineárně elastický model) [24]

Při použití ideálně-plastického konstitutivního modelu se materiál chová do meze plasticity pružně, dále vznikají plastická přetvoření při konstantním napětí. Nejčastěji používaný v geotechnické praxi je Mohr – Coulomb materiálový model, i když nemusí poskytovat vždy zcela objektivní výsledky. Je určen 5 základními

charakteristikami (deformační modul - E_{def} , Poissonovo číslo - ν , soudržnost - c_{ef} , úhel vnitřního tření - ϕ_{ef} , úhel dilatance - ψ). Nezohledňuje změnu tuhosti v závislosti na přetvoření, má tedy stejný modul pružnosti při zatěžování i odlehčování. Dále se vyznačuje identickou podmínkou pro plasticitu i porušení. Reálné výsledky dává model při řešení stabilitních úloh, deformace není schopen modelovat mnohdy zcela objektivně.

Vyjádření Mohr – Colombovy obalové čáry: $\tau = \sigma \tan \phi + c$



Obrázek 18 – Grafické vyjádření Mohr-Coulombovy podmínky porušení a plasticity [24]

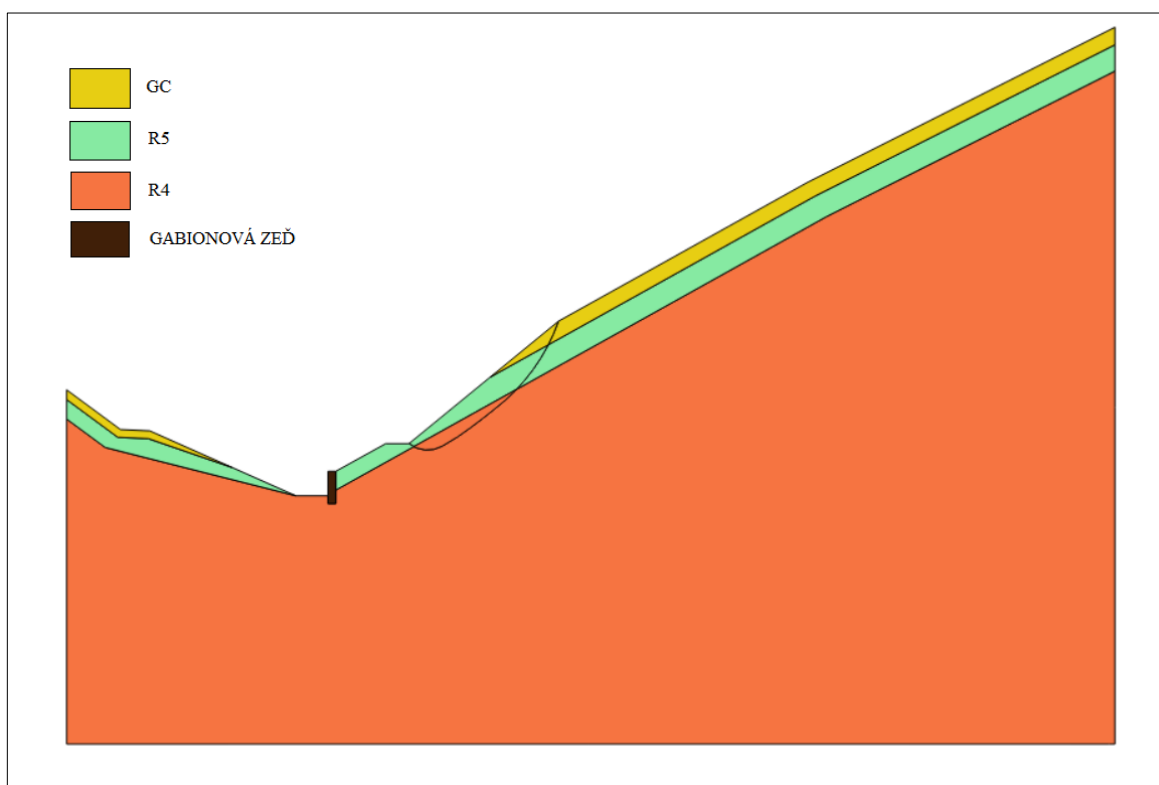
Výpočetní model je rozdělen na jednotlivé fáze, které určují jednotlivé stavy svahu. První fáze je iniciační, která slouží k aktivaci původního napětí/deformačního stavu horninového prostředí. V této situaci byl zvolen typ výpočtu iniciační fáze „Gravity loading“, který je určen pro nehorizontální geologické vrstvy horninového prostředí. V navazujícím kroku na fázi iniciační je nutné resetovat posuny na nulu a typ výpočtu zvolit „Plastic“, který se používá pro elastoplastickou deformační analýzu, při kterých se neuvažuje se změnou pórových tlaků v čase.

Jako iniciační fáze v modelu je proveden původní stav svahu před sesunutím (Obrázek 19). Následující fáze už obsahuje daný sesunutý svah (Obrázek 20). Pro obě fáze je proveden výpočet typu „Safety“, který stanovuje stupeň stability svahu, označený jako M_{sf} . Stupeň stability určuje poměr mezi pasivními silami a silami aktivními. Pokud je účinek

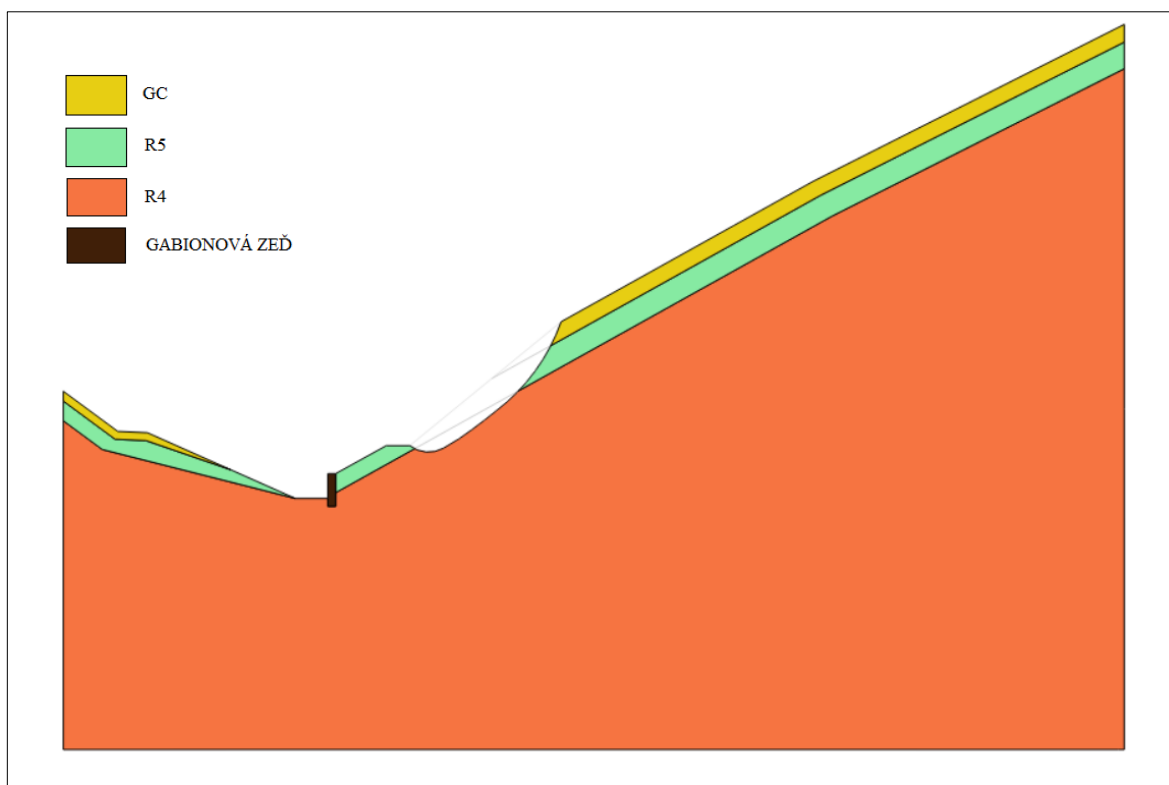
aktivních sil ve svahovém tělese větší než účinek pasivních sil, svah se dává do pohybu.

Pro trvale stabilizované svahy je podle ČSN EN 1997 – 1 daná hodnota stupně stability větší než 1,5. Pro dočasně stabilizované svahy je daná hodnota větší než 1,3.

Řešená oblast je chudá na podzemní vody. Obsahuje vodu průlinovou. Průlinová voda se přemísťuje v pórech hornin filtrací či filtračním prouděním. Ve výpočtovém modelu je proto voda zadávána nepřímou. To znamená, že v modelu není vytvořena souvislá hladina vody. Ta je nahrazena zvýšením objemové hmotnosti horniny γ na hodnotu γ_{sat} a horninové prostředí je definováno jako neodvodněné – „undrained“. Tato situace simuluje vyplnění všech pórů a puklin vodou, což je považováno za nejkritičtější stav. Parametry vstupních hodnot horninového prostředí jsou uvedeny v *Tabulce 1* viz. 4.2.



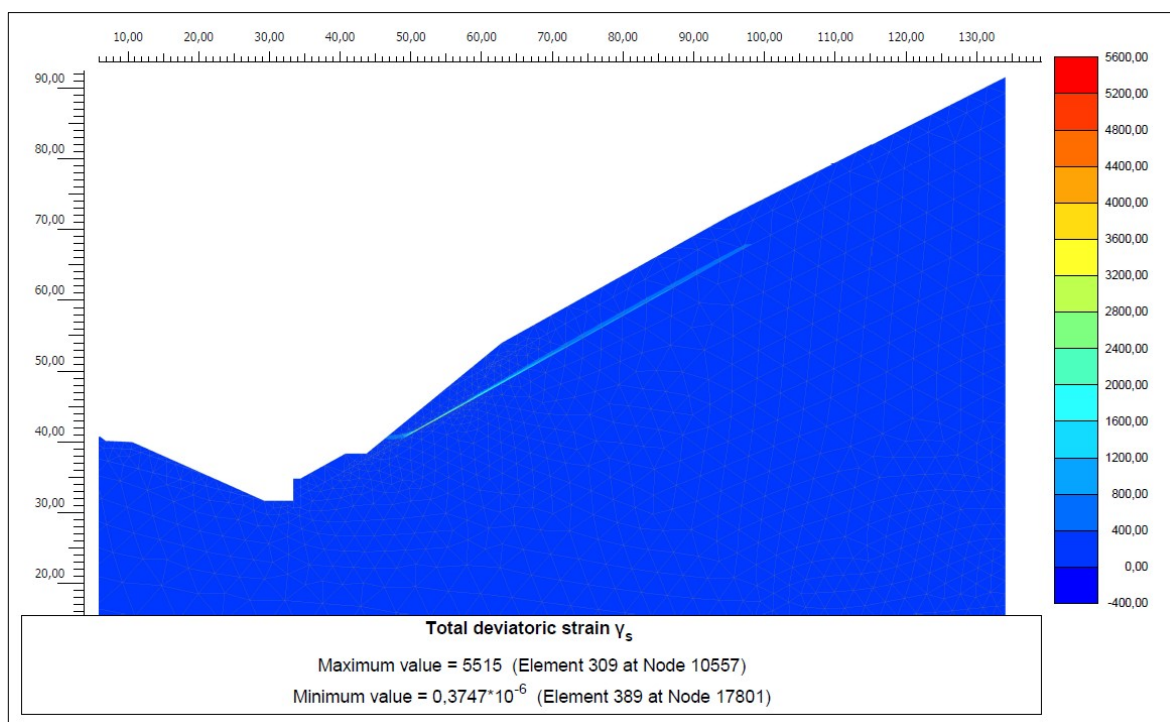
Obrázek 19 – Iniciační fáze - původní stav svahu



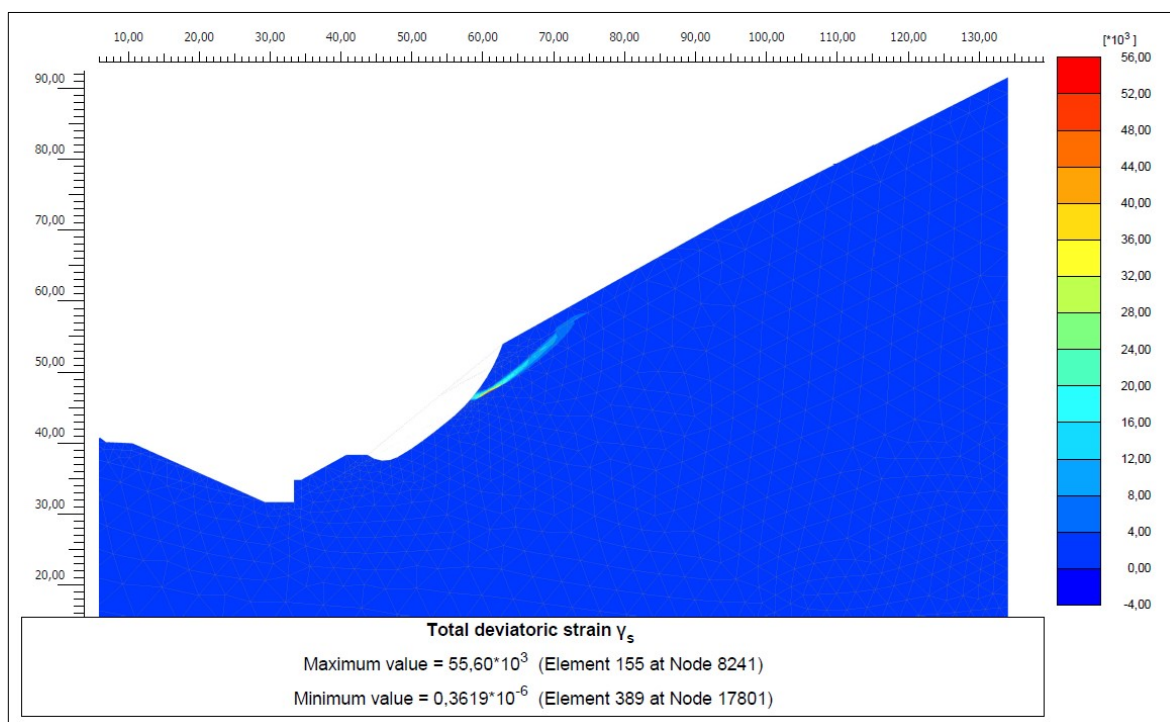
Obrázek 20 – 1. fáze - sesunutý stav svahu

Z výsledků výpočtu stupně stability (*Obrázek 21 a 22*) je zřejmé, že smyková plocha jak u iniciační fáze počátečního stavu, tak u fáze sesunutého stavu, bude soustředěna na rozhraní horninových vrstev. Tento jev je pro ukloněné vrstvy horninového prostředí a taky pro flyšové horniny typický.

U iniciační fáze počátečního stavu je hodnota stupně stability $M_{sf} = 1,002$. Tato hodnota není tak vysoká, aby zaručovala trvalou stabilitu svahu. Odpovídá stavu po odlesnění a odstranění vegetace, protože vliv vegetace do modelů lze zahrnout, jedine zvýšením soudržnosti povrchové vrstvy, kde působí kořenový systém. Toho ale nebylo při výpočtu použito. Původní svah ještě s vegetací, zajišťoval dostatečnou stabilitu svahu. Smyková plocha se vytvořila na rozhraní vrstev velmi slabě zpevněného pískovce třídy R5 a méně zpevněným pískovcem třídy R4.



Obrázek 22 – Průběh smykové plochy na původním stavu svahu [Výstup z PLAXISU 2D]

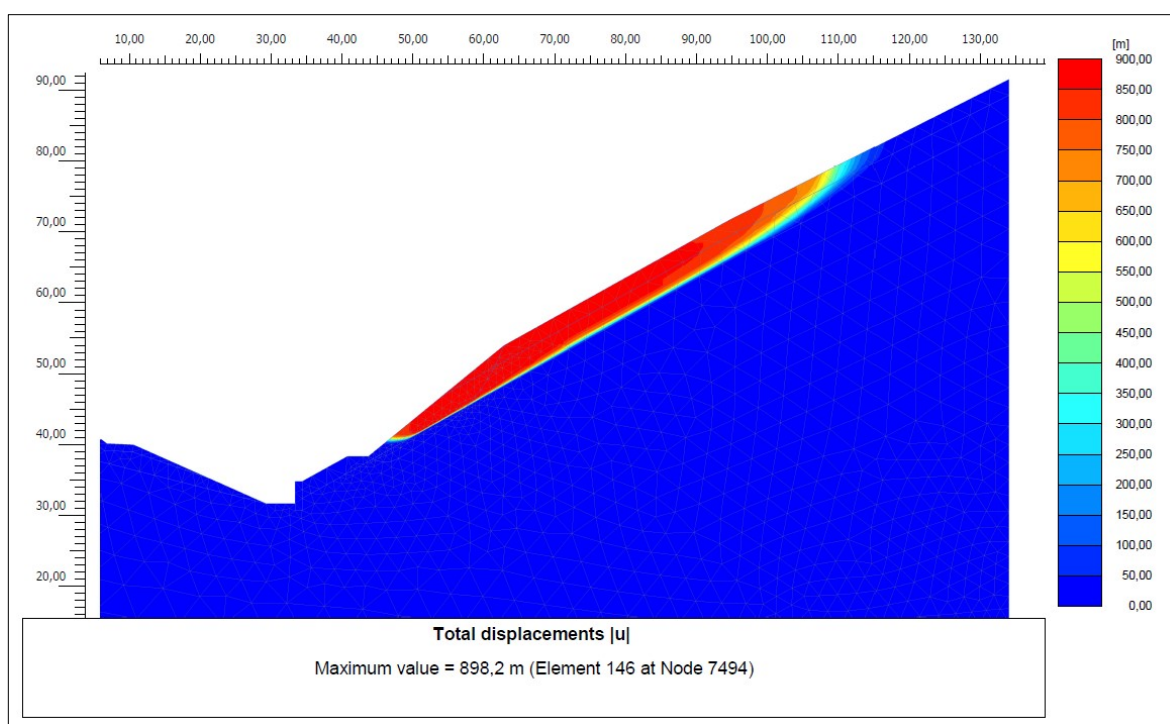


Obrázek 21 – Průběh smykové plochy na sesunutém stavu svahu [Výstup z PLAXISU 2D]

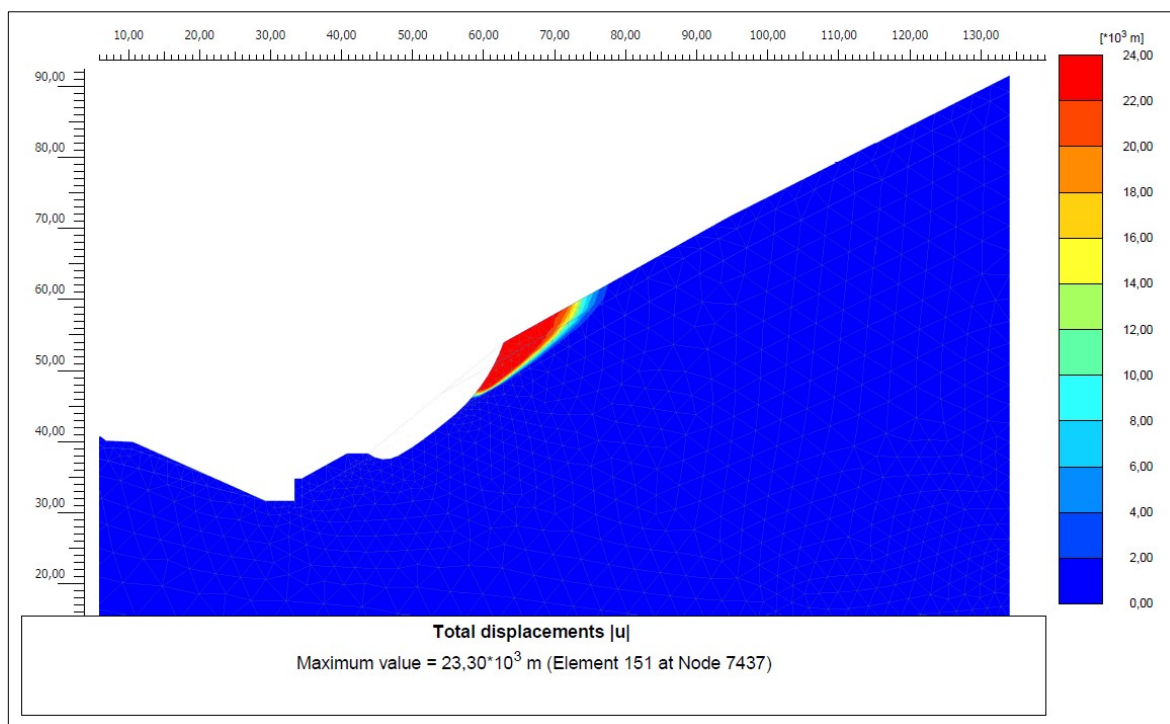
U fáze sesunutého stavu svahu je hodnota stupně stability $M_{sf} = 0,8732$. Smyková plocha se vytvořila na rozhraní horninových vrstev R5 a R4. Prochází méně pevnými horninami, v tomto případě velmi slabě zpevněným pískovcem třídy R5 a jílovitým štěrkem. Hodnota je menší než 1,0, z toho vyplývá, že tento stav není v rovnováze a tudíž může dojít k dalšímu svahovému pohybu. Je nutné navrhnout takové sanační opatření trvalého charakteru, které by zajistilo stabilitu daného svahu.

U výstupu celkových posunů $|u|$ je patrné, že největší hodnoty se soustředí u obou fází kolem smykových ploch. Po těchto plochách se hornina pohybuje (Obrázek 23 a 24).

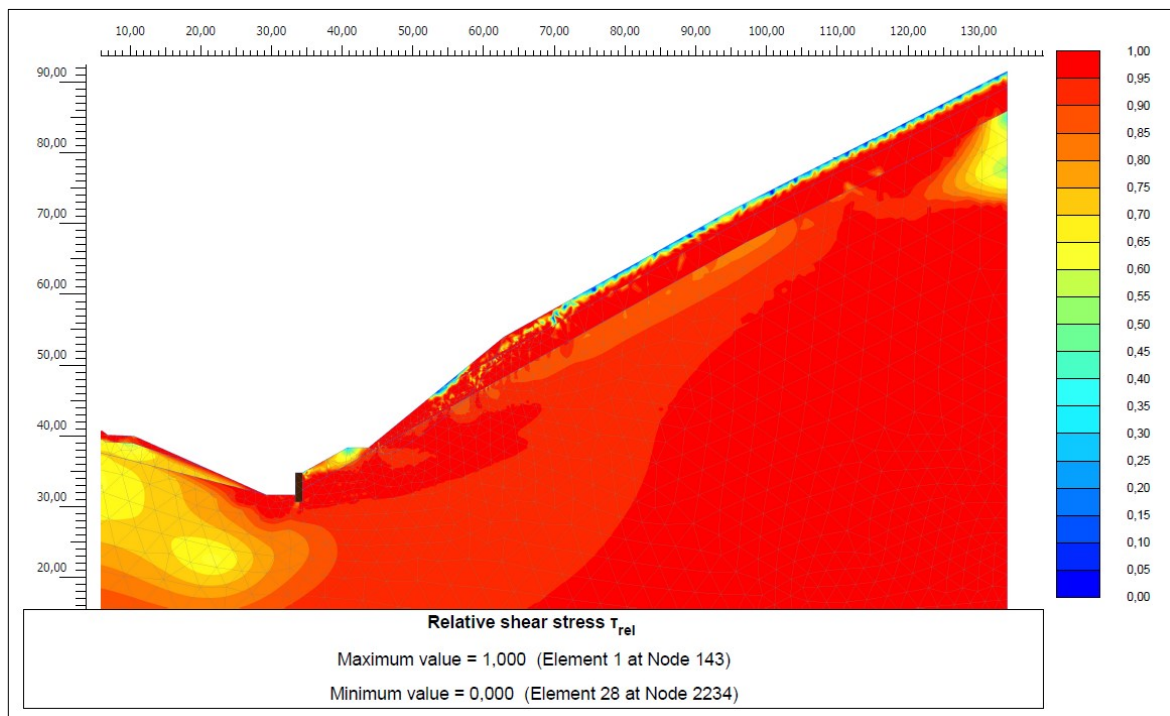
Podobný případ je viděn u čerpání smykové pevnosti τ_{rel} (Obrázek 25 a 26). K největšímu čerpání smykové pevnosti dochází na rozhraní vrstev, kde se nachází smyková plocha. Při překročení smykové pevnosti vzniká porušení horninového prostředí. Horniny ztrácí svou pevnost a dochází k deformacím, posunům.



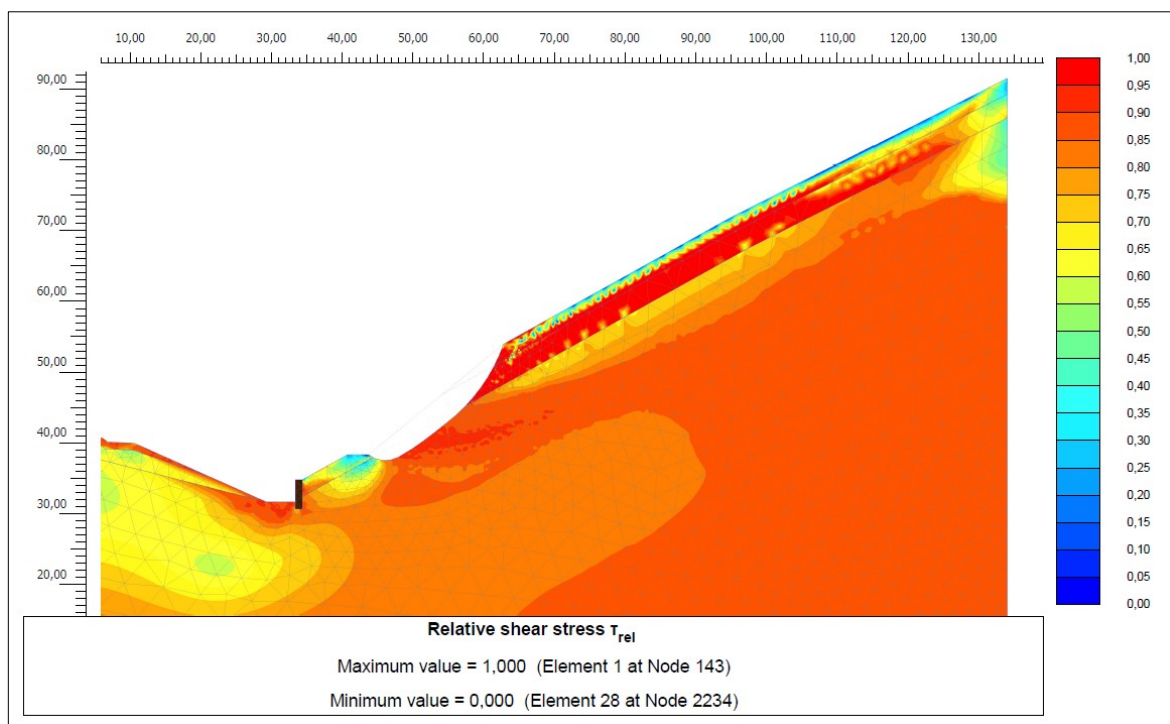
Obrázek 23 – Celkové posuny na původním stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]



Obrázek 24 – Celkové posuny na sesunutém stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]



Obrázek 25 – Čerpání smykové pevnosti na původním stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]



Obrázek 26 – Čerpání smykové pevnosti na sesunutém stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]

5. Sanační opatření

5.1. Druhy sanačních opatření

Vzniknou-li v krajině svahové nestability, je velice vhodné takto porušené oblasti stabilizovat, aby nedocházelo k dalším sesuvům a nebezpečím. K tomu slouží sanační opatření, které dokáží svah upravit tak, aby se dále nesesouval a dostal se zpět do rovnovážného stavu. Sanace se nepoužívají jen na již sesunuté svahy, ale lze je použít i jako preventivní opatření proti sesuvům.

Podle principu realizace a působení rozeznáváme hned několik sanačních metod. V praxi se jednotlivé metody velice často kombinují a doplňují, čímž se zajistí větší stabilita svahu.

5.1.1. Úprava tvaru svahu

Těmito opatřeními měníme rozložení hmot na svahu, to znamená, že zvyšujeme stabilitu svahu buď zvýšením pasivních sil v akumulacích částech sesuvu (přetížením), nebo snížením aktivních sil (odlehčením) v odlučných částech. Do této skupiny sanačních metod se zařazují:

- přitěžovací násypy v patě svahu,
- odlehčovací zářezy v horní části svahu,
- zmírnění sklonu svahu,
- přemístění materiálu z horní části svahu k patě,
- odstranění sesunutého materiálu. [2]

5.1.2. Odvodnění sesuvu

Při odvodnění svahů se musí zamezit vnikání srážkových vod do svahu (povrchové odvodnění) a odvést prosáknutou vodu do tělesa sesuvu (hloubkové odvodnění). Povrchové odvodnění samo o sobě ve většině případů nestačí ke stabilizaci sesuvů, ale je důležitou součástí sanačních prací a může podstatně přispět k vysušení a tím k uklidnění sesuvu.

Hloubkové odvodnění svahu je jedním z nejpoužívanějších opatření jak při stabilizaci svahu, tak při zabezpečování umělých svahů.

Při povrchovém odvodnění se provádějí tato opatření:

- Obvodové příkopy
- Odvodňovací příkopy
- Utěsnění trhlin
- Překrytí svahu foliemi
- Vytvoření nepropustného pokryvu bitumenem apod.

Při hloubkovém odvodnění se provádějí tato opatření:

- Zachytávání a odvedení podzemní vody
- Odvodňovací štoly
- Horizontální odvodňovací vrty
- Drenážní studně
- Odvodňovací šterkové stěny
- Elektroosmóza [2]

5.1.3. Ochrana svahu před zvětráváním a erozí

Cílem těchto sanačních metod je zabránit zhoršování mechanických vlastností hornin vlivem zvětrávání nebo působením eroze vodních toků, abraze na březích vodních nádrží. Patří sem:

- Vegetační pokryv
- Pláště ze stříkaného betonu
- Torkrétové omítky
- Kotvené obkladové zdi
- Opevňování břehů vodních toků
- Vlnolamy [2]

5.1.4. Technické stabilizační opatření

Tato skupina metod zahrnuje širokou škálu technicky stabilizačních opatření, které jsou velmi účinné. Jsou velmi pracné a nákladné, ale pro definitivní stabilizaci porušených svahů většinou nevyhnutelné. V praxi se jednotlivé sanační opatření velmi často vzájemně kombinují, aby se zvýšil jejich účinek. Můžeme zde zařadit:

- Stabilizační žebra
- Zárubní, opěrné a stabilizační stěny
- Pilotové a štětové stěny
- Kotvení svorníky a zemními kotvami
- Kotvené pilotové stěny

5.1.5. Zpevňování zemin

Metodami zpevňování hornin se zvyšuje jejich smyková pevnost, čímž se podmiňuje růst pasivních sil. V praxi se používají zřídka. Patří sem:

- Injektování
- Tepelné zpevňování zemin
- Elektrochemické zpevňování zemin
- Zmrazování zemin [2]

5.2. Návrh variantních sanačních opatření posuzovaného svahu

Pro stabilizaci posuzovaného svahu jsou navrženy sanační opatření, které zajistí svah proti dalším pohybům. Jsou navrženy dvě sanace, které pak budou navzájem porovnány. Je použito přitížení paty svahu v kombinaci s horninovými kotvami. Největší vliv na zajištění stability svahu mají právě horninové kotvy, které přerušují smykovou plochu svahu. Proto jsou použity v obou variantních případech. Hlavní rozdíl mezi jednotlivými návrhy je ve způsobu přitížení a úpravy paty svahu a úpravy sklonu porušeného svahu.

5.2.1. Návrh sanace pomocí horninových kotev, gabionovou stěnou a úpravou sklonu svahu

Sanace sesunutého stavu řešeného svahu je navržena s použitím:

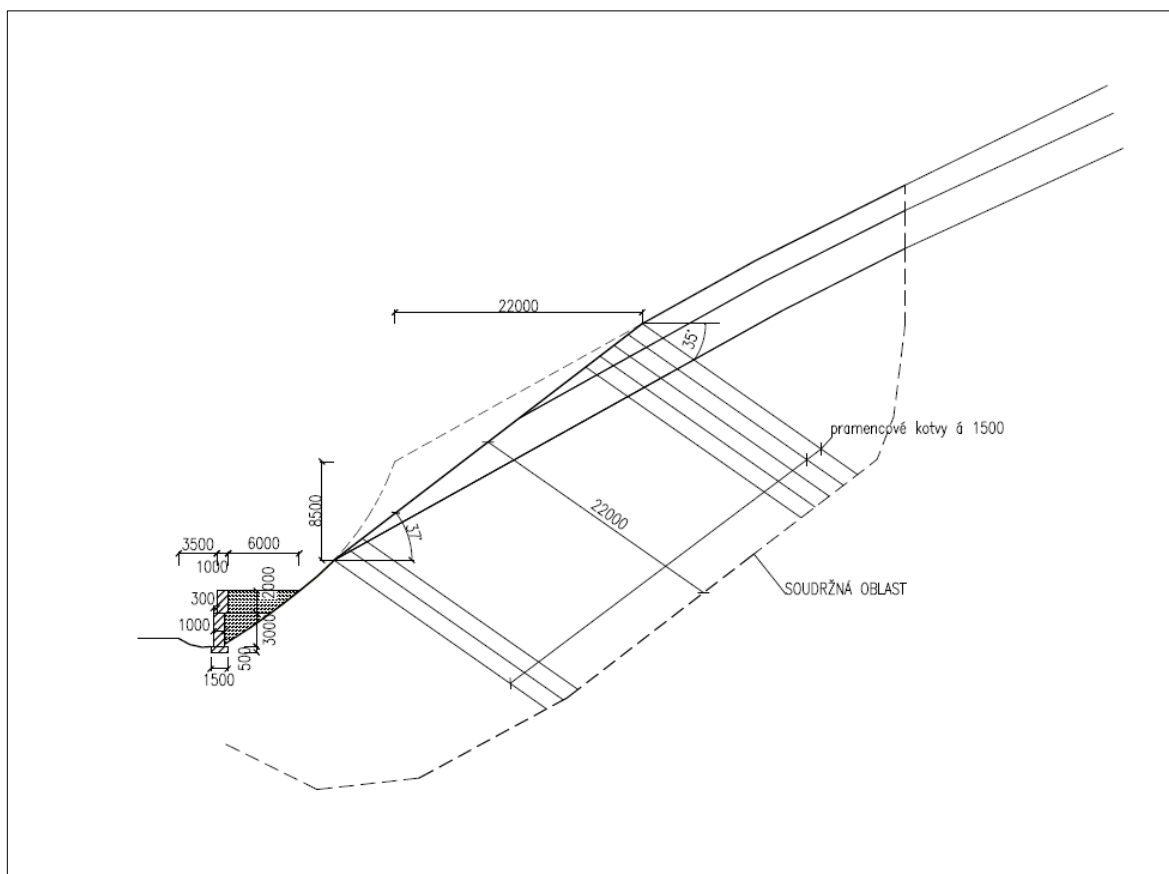
- gabionové zdi v patě svahu,
- úpravou sklonu svahu,
- horninových kotev.

Gabionová zeď bude široká 1 m a celkově vysoká 5 m od terénu. Po výšce 3 m je rozdělena a proveden odstup hrany o 0,3 m směrem ke svahu. Základ stěny bude zapuštěn do hloubky 0,5 m a šířka základu je 1,5 m. Nejdříve se vyčistí stávajícího příkop v patě svahu z důvodu nánosů balvanů z vyšších partií svahu. Základová spára pod zdí se zarovná a upraví zhutněným materiálem. Prostor mezi rubem konstrukce a rostlým terénem (hranou sesuvu) bude vyplněn hutněným štěrkovým zásypem, který bude současně plnit i funkci drenážní a odvádět vodu ze svahu. Hutněný zásyp se bude provádět po jednotlivých vrstvách o mocnosti 0,4 m. Svrchní vrstva zásypu bude tvořena živici o mocnosti cca 0,2 m. Před gabionovou stěnou budou osazeny do pískového lože betonové kanalizační dílce, které budou odvádět vodu ze svahu. Zároveň budou zabráňovat vymílání paty svahu vodou.

Vrchní část odtrženého svahu, kde sklon dosahuje hodnoty až 60°, se odtěží a zarovná pod sklonem 37°. Od hrany sesuvu horizontálně do svahu asi 22 m. Na takto zarovnanou plochu se položí geomříž, která bude plnit funkci stabilizační a ochrany. Při použití geomříže s menšími otvory, nebude docházet k nadměrnému vypadávání horninového materiálu. V rámci návrhu je doporučeno vysadit novou vegetaci, aby se mohl opět aktivovat kořenový systém rostlin, a tím zvýšit stabilita svahu.

Nejdůležitějším prvkem sanačního řešení jsou 5 pramencové horninové kotvy z oceli 1670/1860 MPa a průměru pramene 15,7 mm. Jsou navrženy v horizontální osově vzdálenosti 2 m a vertikální osově vzdálenosti 1,5 m. Použitá délka kotev je 22 m, úklon kotev od horizontály je 40°. Kotvy jsou uloženy do předem vyvrtaných vrtů o průměru 120 mm. Po osazení kotvy do vrtu vyplněného zálivkou se provede injektáž kořene kotvy cementovou injektážní směsí. Kořen kotvy je navržen o únosnosti min. 1000 kN.

Poté se z jednotlivých částí sestaví hlava kotvy. Ty jsou upnuty na roznášecí práh tvořený z 2 x U 240 profilu. Roznášecí práh bude tvořen dělenými úseky délky cca 1,4 m. To znamená, že každé liché pole bude zajištěno převázkou a každé sudé pole bude prázdné – bez převázky. Konstrukce nesmí být vybavena kontinuální převázkou délky rovnající se délce opěrné konstrukce. V určeném časovém intervalu po injektáži je možno kotvu napnout. Navržené předpjetí kotev je 400 kN. [25, 26]



Obrázek 27 - Schéma návrhu sanace č. 1

5.2.2. Návrh sanace pomocí horninových kotev a mikrozáporové stěny

Sanace sesunutého stavu řešeného svahu je navržena s použitím:

- mikrozáporové stěny v patě svahu,
- horninových kotev.

Mikrozáporová stěna je podobného charakteru a funkce jako mikropilotová stěna. Do vrtu se osadí válcovaný profil I nebo H a vrt se vyplní cementovou zálivkou. Osová vzdálenost mezi jednotlivé vrty by měla být maximálně 3 x průměr vrtu. Na rozdíl od mikropilotové stěny nemají mikrozápory injektovanou spodní část vrtu.

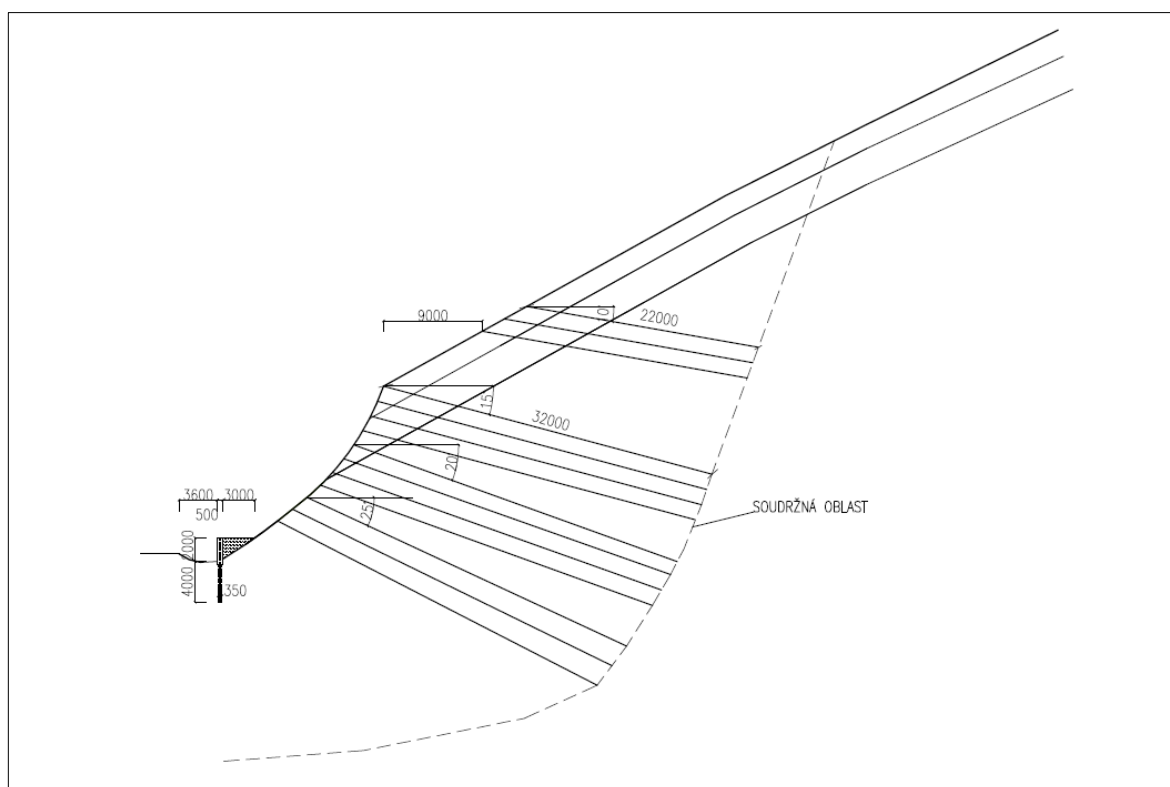
Pro konstrukci mikrozáporové stěny je použitý IPE profil 180, který je osazen do vrtu průměru 350 mm v osově vzdálenosti 1 m. Celková délka profilu je 6 m, z toho 2 m budou nad terénem sloužit jako součást stabilizační betonové zdi. Nejdříve se vyčistí stávajícího příkop v patě svahu z důvodu nánosů balvanů z vyšších partií svahu. Vyvrtají se vrty pro osazení záporů a vyvrtaná hornina bude odtěžena. Osadí se záporů ve správné poloze a vrt se zalije betonovou směsí. V horní části záporů bude zhotovena betonová zeď výšky 2 m a tloušťky 0,5 m. Zeď bude z betonu (C20/25 XF2), vyztužená armovanou kármí sítí 100/100/8 mm, které se přivaří k ocelovým záporům. Následně se výztuž zatorkrétuje betonem. Stabilizační zeď bude dilatována po úsecích á 10 m pomocí polystyrenu tloušťky 20 mm. Prostor mezi rubem konstrukce a rostlým terénem (hranou sesuvu) bude vyplněn hutněným šterkovým zásypem, který bude současně plnit i funkci drenážní a odvádět vodu ze svahu. Hutněný zásyp se bude provádět po jednotlivých vrstvách o mocnosti 0,4 m. Svrchní vrstva zásypu bude tvořena živíci o mocnosti cca 0,2 m. Odvodnění bude zajištěno položením flexibilní drenážní trubky DN 100 v rubu konstrukce s vyvedením před betonovou stěnu, kde budou osazeny do pískového lože betonové kanalizační dílce, které budou odvádět vodu ze svahu. Zároveň budou zabráňovat vymílání paty svahu vodou. [27, 28]

I v tomto případě jsou nejdůležitějším prvkem sanačního řešení pramencové horninové kotvy z oceli 1670/1860 MPa a průměru pramene 15,7 mm. Počet pramenů použitých v tomto případě je 8. Kotvy jsou navrženy v horizontální osově vzdálenosti 2 m a vertikální osově vzdálenosti 1,5 m. Použitá délka kotev je 32 m, úklon kotev od horizontály je 15° - 25°, v závislosti na umístění kotvy ve svahu. Kotvy jsou uloženy do předem vyvrtaných vrtů o průměru 150 mm. Po osazení kotvy do vrtu vyplněného zálivkou se provede injektáž kořene kotvy cementovou injektážní směsí. Kořen kotvy je navržen o únosnosti min. 1700 kN. Poté se z jednotlivých částí sestaví hlava kotvy. Ty jsou upnuty na roznášecí práh tvořený z 2 x U 240 profilu. Roznášecí práh bude tvořen dělenými úseky délky cca 1,4 m. To znamená, že každé liché pole bude zajištěno převázkou a každé sudé pole bude prázdné – bez převázky. Konstrukce nesmí být vybavena kontinuální převázkou

délky rovnající se délce opěrné konstrukce. V určeném časovém intervalu po injektáži je možno kotvu napnout. Navržené předpjetí kotev je 400 kN. [25, 26]

Při tomto sanačním návrhu není provedena změna sklonu svahu jako u předešlého případu. Proto jsou použity delší kotvy s větším počtem pramenů, aby bylo dosaženo smykových ploch ve svahu. Je doporučeno odstranit zvětralou část sesuvu a sklon podélně zarovnat. Na takto zarovnanou plochu se položí geomříž, která bude plnit funkci stabilizační a ochranou. Při použití geomříže s menšími otvory, nebude docházet k nadměrnému vypadávání horninového materiálu. V rámci návrhu je doporučeno vysadit novou vegetaci, aby se mohl opět aktivovat kořenový systém rostlin, a tím zvýšit stabilita svahu.

Z důvodu nestability hlavně povrchových vrstev jsou navrženy dvě řady kotev nad horní hranu sesuvu, cca 9 m od hrany. Použité jsou 4 pramencové kotvy délky 22 m, úklonem od horizontály 10° . Ty by měly zajistit stabilitu povrchových vrstev.



Obrázek 28 - Schéma návrhu sanace č. 2

6. Modelová analýza navržených variant sanací

Modelování navržených sanací navazuje na dvě předchozí fáze výpočtu viz. 4.3. Označujeme návrh sanace jako 2. fázi, použitý byl výpočetní typ „Plastic“. V tomto výpočtovém kroku byly použity dva konstitutivní materiálové modely (Mohr – Coulomb a linear elastic). Vstupní geometrie svahu byla rozdělena u paty svahového sesuvu na dvě poloviny. V každé polovině byl použit jeden materiálový model. Využitím lineárně elastického modelu, který simuluje chování zemin při drobném přetvoření se zajišťuje, aby v oblasti použité Mohr – Coulombem byla zjištěna požadovaná kritická smyková plocha. Na 2. fázi byl opět použit typ výpočtu „Safety“, pro zjištění stupně stability návrhu.

6.1. Návrh sanace pomocí horninových kotev, gabionovou stěnou a úpravou sklonu svahu

V této fázi je budováno sanační opatření s použitím gabionové zdi v patě svahu, úpravou sklonu svahu, horninových kotev. Při návrhu horninových kotev a gabionové stěny byly použity do modelu tyto vstupní parametry (*Tabulka 2*).

*Tabulka 2 – Vstupní parametry horninového prostředí
a konstrukcí do matematického modelu*

Typ zeminy/horniny	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [MPa]	ν [-]	c [kPa]	φ [°]	$k_x=k_y$ [m/den]	σ_c [MPa]
G5 - GC	19,5	21,5	40	0,3	10	28	0,864	-
Pískovec R5	22	24	30	0,25	16	23	86,4	1,5 – 5
Pískovec R4	24	26	100	0,25	30	24	86,4	5 – 15
Gabionová zeď	26	28	65	0,2	-	-	86,4	-
Štěrk G1 - GW	20	22	100	0,2	-	36	8,64	-

Ve výpočtovém modelu je voda zadávána nepřímo. Je nahrazena zvýšením objemové hmotnosti horniny γ na hodnotu γ_{sat} a horninové prostředí je definováno jako neodvodnné – „undrained“. Tato situace simuluje vyplnění všech póru a puklin vodou, což je považováno za nejkritičtější stav.

Aplikace horninových kotev do modelu byla zadána pomocí oblasti s větší soudržností, která zahrnuje vlastnosti kotev. Tento postup byl zvolen z důvodu jednoduššího zadávání většího počtu kotev do modelu a taky především proto, že kotvy nepůsobily ve výpočtech správně. Oblast ohraničuje působení kotev v horninovém prostředí. Parametr soudržnosti zeminy soudržnější oblasti se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$c'' = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{P}{F}$$

$$c' = \frac{c''}{1,5}$$

$$c_{\text{soudr}\check{z}} = c' + c_{\text{p}\check{u}\text{v}}$$

Kde:	φ	je úhel vnitřního tření zeminy,
	P	je výpočtová únosnost kotvy,
	F	je plocha působení prostředí, která připadá na jednu kotvu,
	c''	je soudržnost hřebíků (kotev),
	c'	je výpočtová soudržnost,
	$c_{\text{p}\check{u}\text{v}}$	je původní soudržnost,
	$c_{\text{soudr}\check{z}}$	je celková soudržnost oblasti.

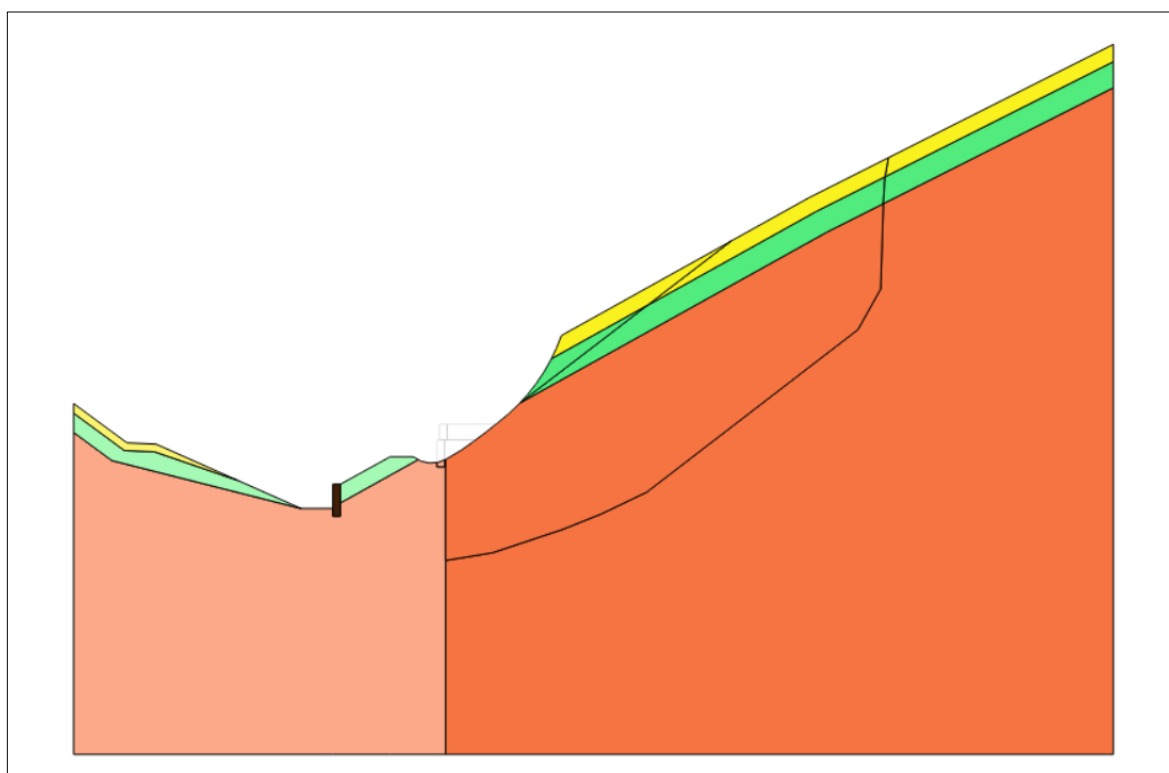
Jsou navrženy 5 pramencové horninové kotvy oceli 1670/1860 MPa a průměru pramence 15,7 mm. Výpočtová únosnost kotvy je min. 1000 kN. Kotvy jsou navrženy v rastru 2 x 1,5 m.

Tabulka 3 – Výpočet hodnoty soudržnější oblasti návrhu č. 1

Typ zeminy/horniny	φ [°]	c'' [kPa]	c' [kPa]	$c_{pův}$ [kPa]	$c_{soudrž}$ [kPa]
G5 - GC	28	277	184,7	10	190
Pískovec R5	23	251,8	167,8	16	180
Pískovec R4	24	256,6	171	30	200

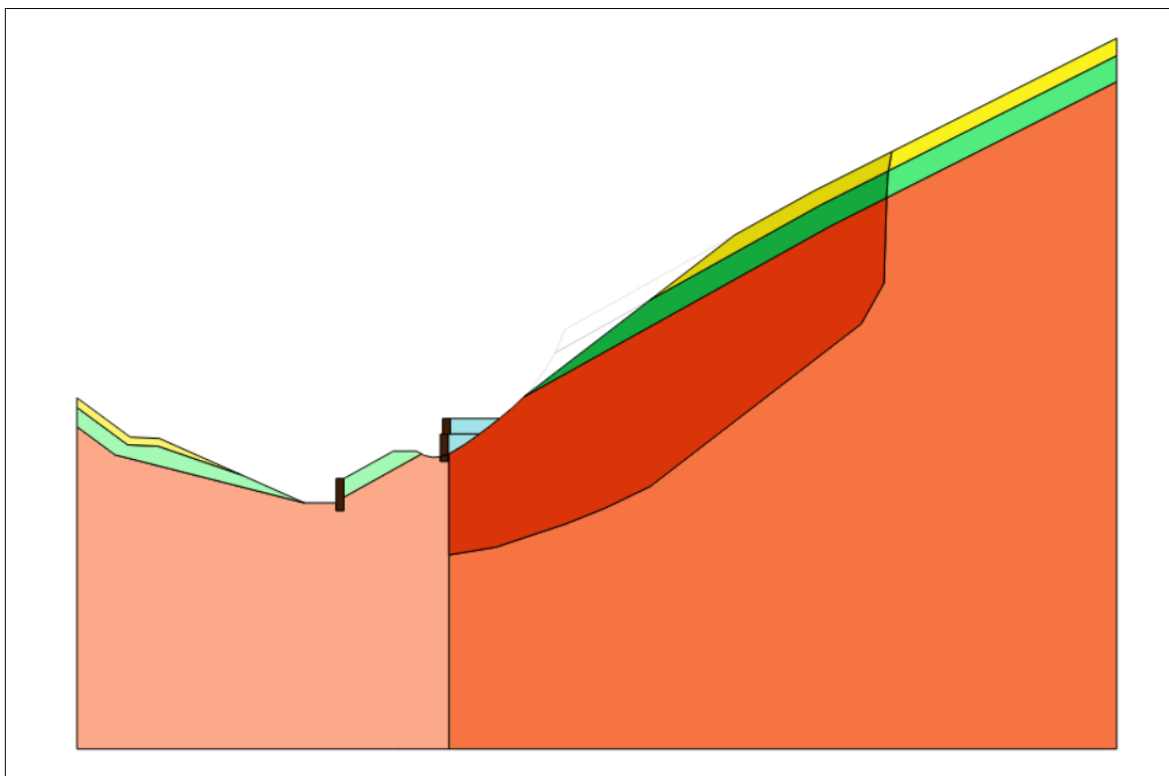
Pozn. Hodnoty $c_{soudrž}$ jsou zaokrouhleny směrem dolů, na stranu bezpečnou.

Gabionová stěna se štěrkovým zásypem je modelována jako „linear elastic“.



Obrázek 29 – Geometrie 1. fáze sanačního návrhu č. 1

(Slabě vyznačená oblast – lineárně elastický model, silněji vyznačená oblast –
Mohr – Coulombův model)

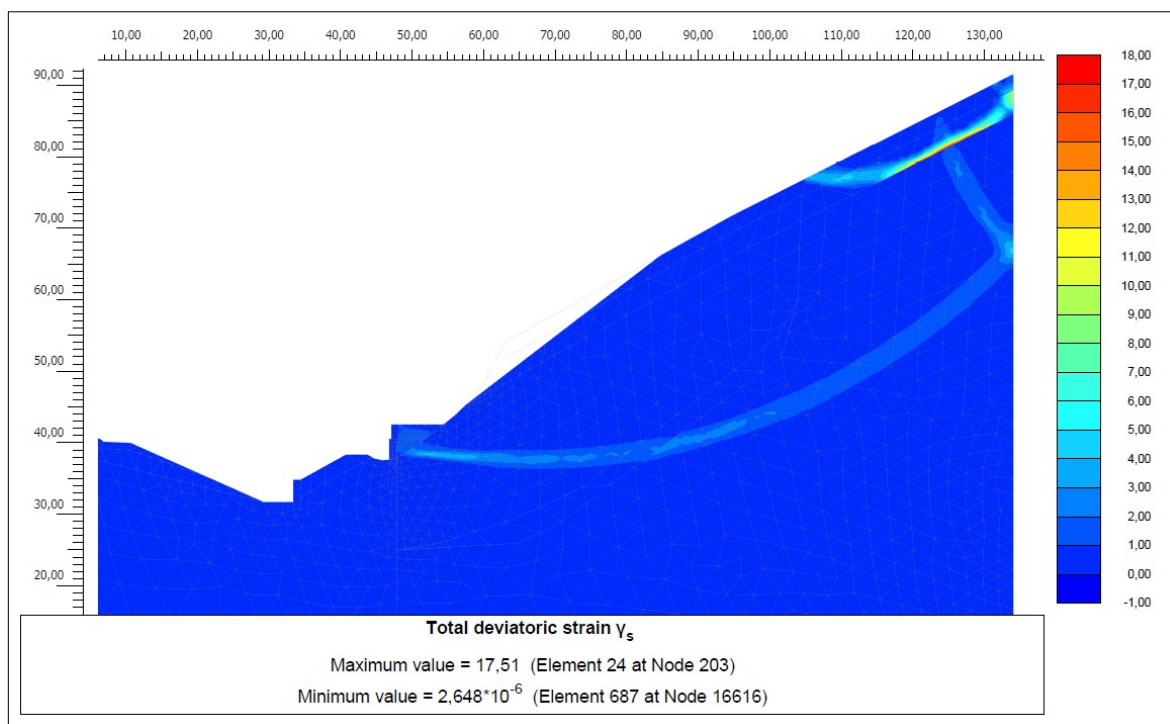


Obrázek 30 – Geometrie 2. fáze sanačního návrhu č. 1

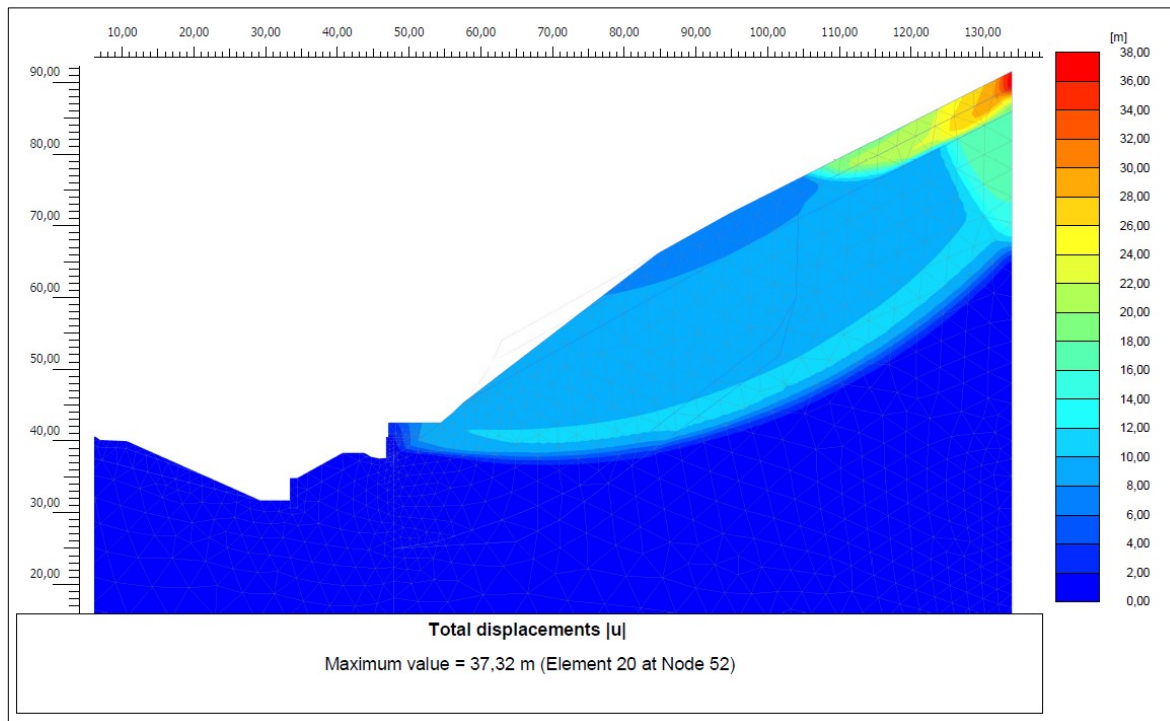
(Slabě vyznačená oblast – lineárně elastický model, středně silně vyznačená oblast – Mohr – Coulombův model, silně vyznačená oblast – soudržnější oblast s působením kotev)

Po provedení výpočtu zadaného modelu byl zjištěn stupeň stability. Ten dosahuje v tomto navrženém případě hodnoty 1,571. Navržené sanační opatření z hlediska stupně stability vyhovuje pro trvalé stabilní svahy. Z průběhu smykové plochy je vidět, že ve svahu vznikají další smykové plochy. Spodní smyková plocha je zachycena gabionovou stěnou v patě svahu, a tudíž nemá rozhodující vliv na stabilitu návrhu. Svrchní smyková plocha se nachází na rozhraní vrstev velmi slabě zpevněného pískovce R5 a pískovce třídy R4. Ta je zachycena soudržnou oblastí s horninovými kotvy (*Obrázek 31*).

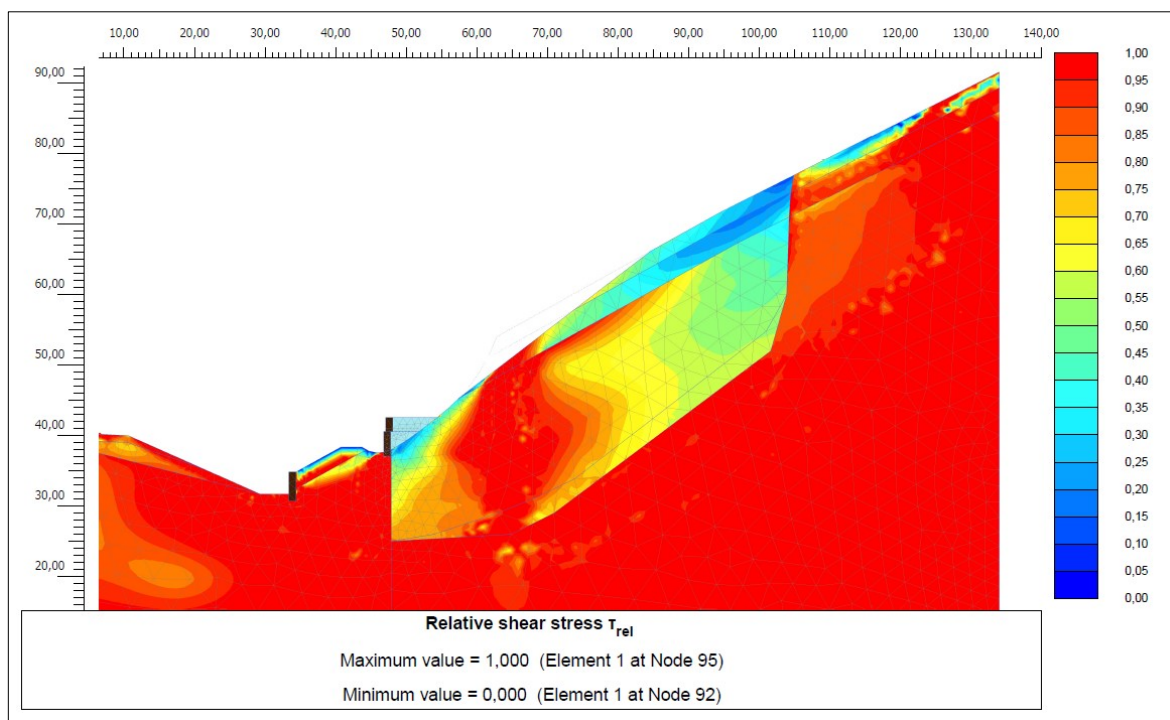
Z dalších modelových výstupů je zřejmé, že celkové posuny kopírují pohyb s nově vzniklou smykovou plochou u paty svahu (*Obrázek 32*). Smyková pevnost v hornině, která není přímo zasažena kotevními prvky (soudržnější oblastí), je značně snížena. Soudržnější oblast má vysokou hodnotu soudržnosti (*Obrázek 33*).



Obrázek 31 – Průběh smykové plochy na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]



Obrázek 32 – Celkové posuny na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]



Obrázek 33 – Čerpání smykové pevnosti na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]

6.2. Návrh sanace pomocí horninových kotev a mikrozáporovou stěnou

Tato fáze je opět budována jako 2. fáze výpočetního modelu. V návrhu je použita mikrozáporová stěna v patě svahu v kombinaci s horninovými kotvami. Při návrhu horninových kotev a mikrozáporové stěny byly použity do modelu stejné vstupní parametry jako předchozím případě (viz *Tabulka 2*).

Ve výpočtovém modelu je voda zadávána nepřímo. Je nahrazena zvýšením objemové hmotnosti horniny γ na hodnotu γ_{sat} a horninové prostředí je definováno jako neodvodněné – „undrained“. Tato situace simuluje vyplnění všech pórů a puklin vodou, což je považováno za nejkritičtější stav.

Aplikace horninových kotev do modelu byla zadána pomocí oblasti s větší soudržností, která zahrnuje vlastnosti kotev. Tento postup byl zvolen z důvodu jednoduššího zadávání většího počtu kotev do modelu a taky především proto, že kotvy nepůsobily

ve výpočtech správně. Oblast ohraničuje působení kotev v horninovém prostředí. Parametr soudržnosti zeminy soudržnější oblasti se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$c'' = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{P}{F}$$

$$c' = \frac{c''}{1,5}$$

$$c_{soudr\check{z}} = c' + c_{p\check{u}v}$$

Kde:	φ	je úhel vnitřního tření zeminy,
	P	je výpočtová únosnost kotvy,
	F	je plocha působení prostředí, která připadá na jednu kotvu,
	c''	je soudržnost hřebíků (kotev),
	c'	je výpočtová soudržnost,
	$c_{p\check{u}v}$	je původní soudržnost,
	$c_{soudr\check{z}}$	je celková soudržnost oblasti.

Jsou navrženy 8 pramencové horninové kotvy oceli 1670/1860 MPa a průměru pramence 15,7 mm. Výpočtová únosnost kotvy je min. 1700 kN. Kotvy jsou navrženy v rastru 2 x 1,5 m.

Tabulka 4 – Výpočet hodnoty soudržnější oblasti návrhu č. 2

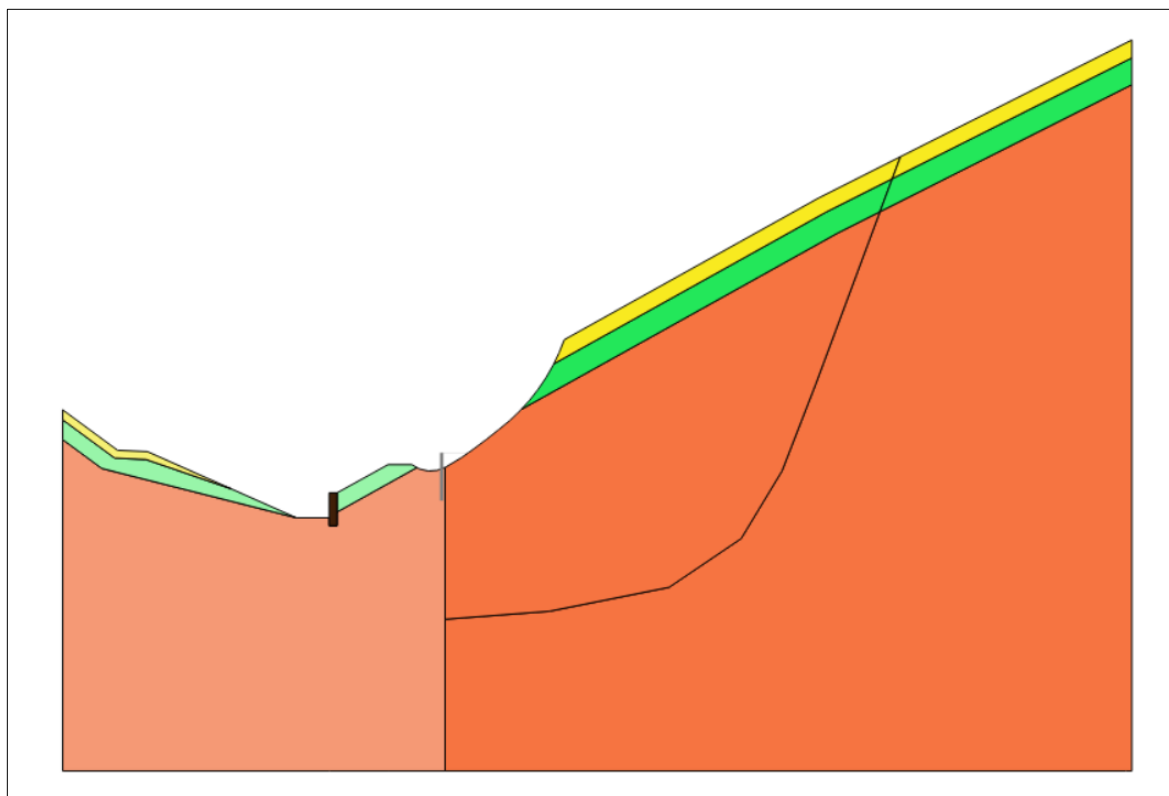
Typ zeminy/horniny	φ [°]	c'' [kPa]	c' [kPa]	$c_{p\check{u}v}$ [kPa]	$c_{soudr\check{z}}$ [kPa]
G5 - GC	28	471,54	314	10	320
Pískovec R5	23	428	285	16	300
Pískovec R4	24	436	290,8	30	320

Pozn. Hodnoty $c_{soudr\check{z}}$ jsou zaokrouhleny směrem dolů, na stranu bezpečnou.

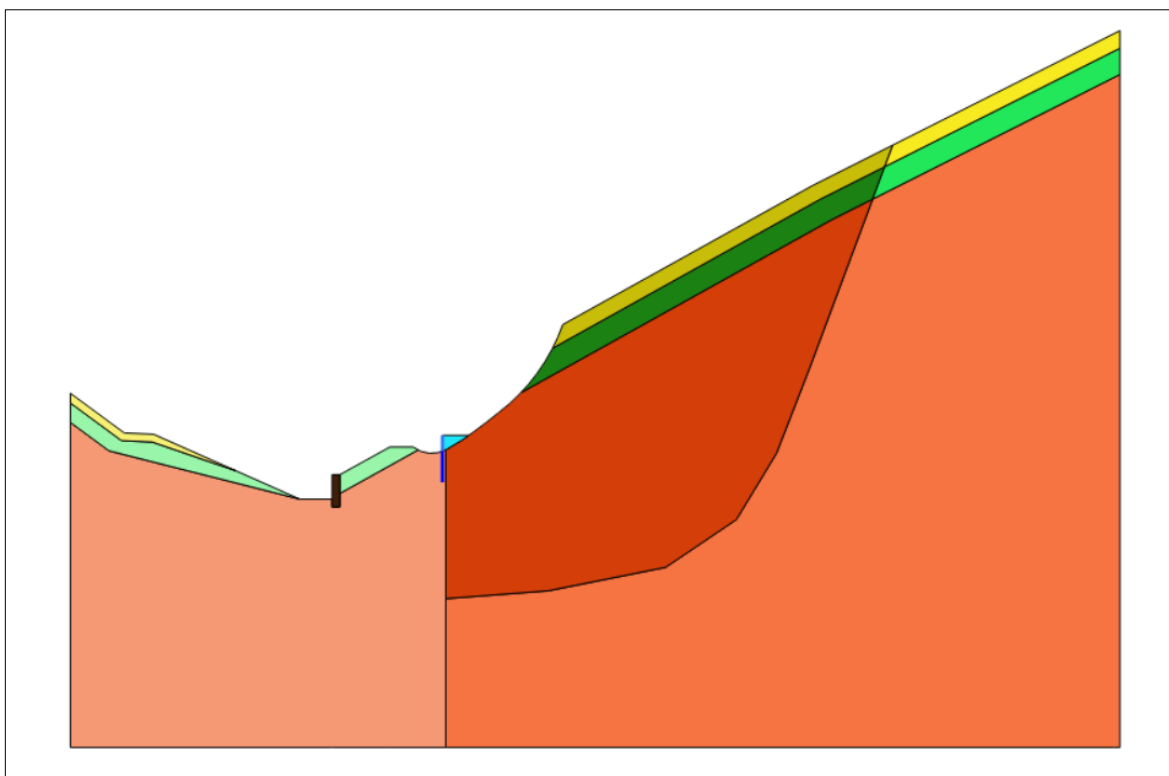
Přítěžovací konstrukce paty svahu je provedena mikrozáporovou stěnou. Za rubem zdi je proveden šterkový zásyp. Celá konstrukce přitížení je modelována jako „linear elastic“. Mikrozáporová stěna je vytvořena pomocí prvku „Plate“. Skládá se ze dvou částí. Každá je definována jinými vlastnostmi. Část osazená v zemině (mikrozápory) je zadána jen jako ocelová zápora, bez uvažování vlivu betonové zálivky ve vrtu. Druhá část stěny, nad terénem, je zadána jako betonová zeď. Není zde uvažován vliv ocelové výztuže. Takto navolená konstrukce má menší tuhost než ve skutečnosti, z toho vyplývá, že pokud konstrukce vyhoví, ve skutečnosti bude ještě únosnější, tudíž jsme na straně bezpečné. Hodnoty materiálu mikrozáporové stěny použité do modelového výpočtu jsou uvedeny v *Tabulce 5*.

Tabulka 5 – Hodnoty materiálu mikrozáporové stěny [29, 30]

Materiál	E [MPa]	A [m ²]	I [m ⁴]
Válcovaný nosník IPE 180	210 000	$2,39 \cdot 10^{-6}$	$13,2 \cdot 10^{-6}$
Beton C20/25	29 000	0,4	$5,33 \cdot 10^{-3}$



Obrázek 34 – Geometrie 1. fáze sanačního návrhu č. 2

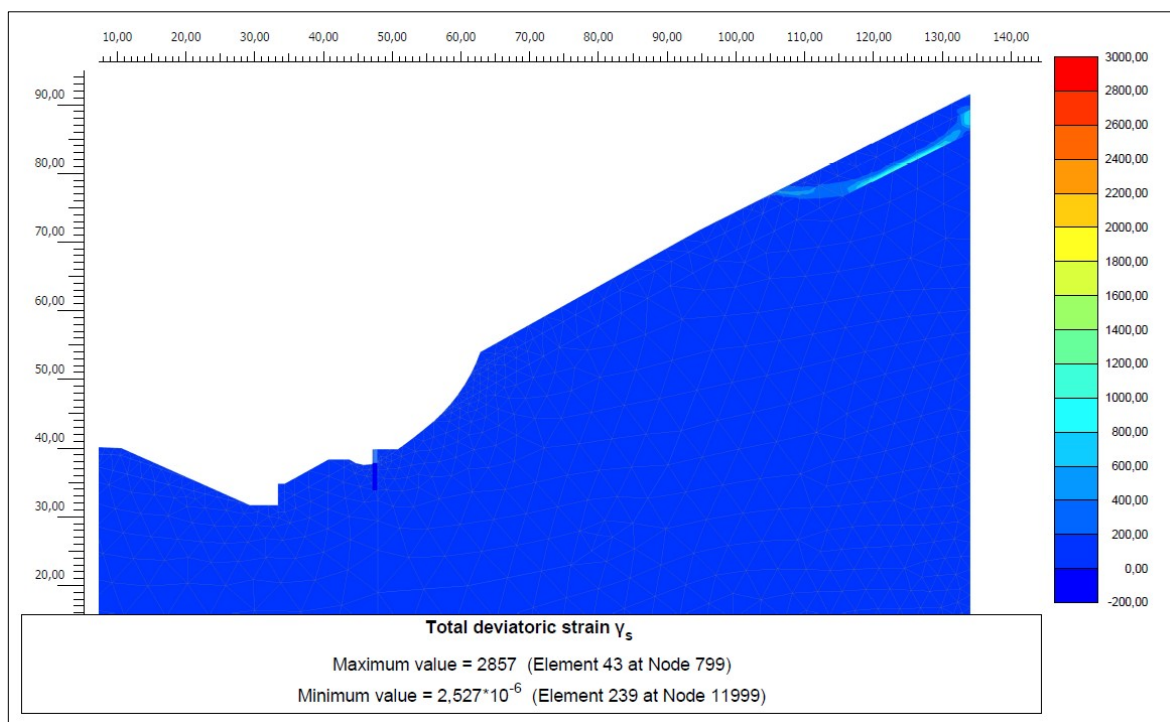


Obrázek 35 – Geometrie 2. fáze sanačního návrhu č. 2

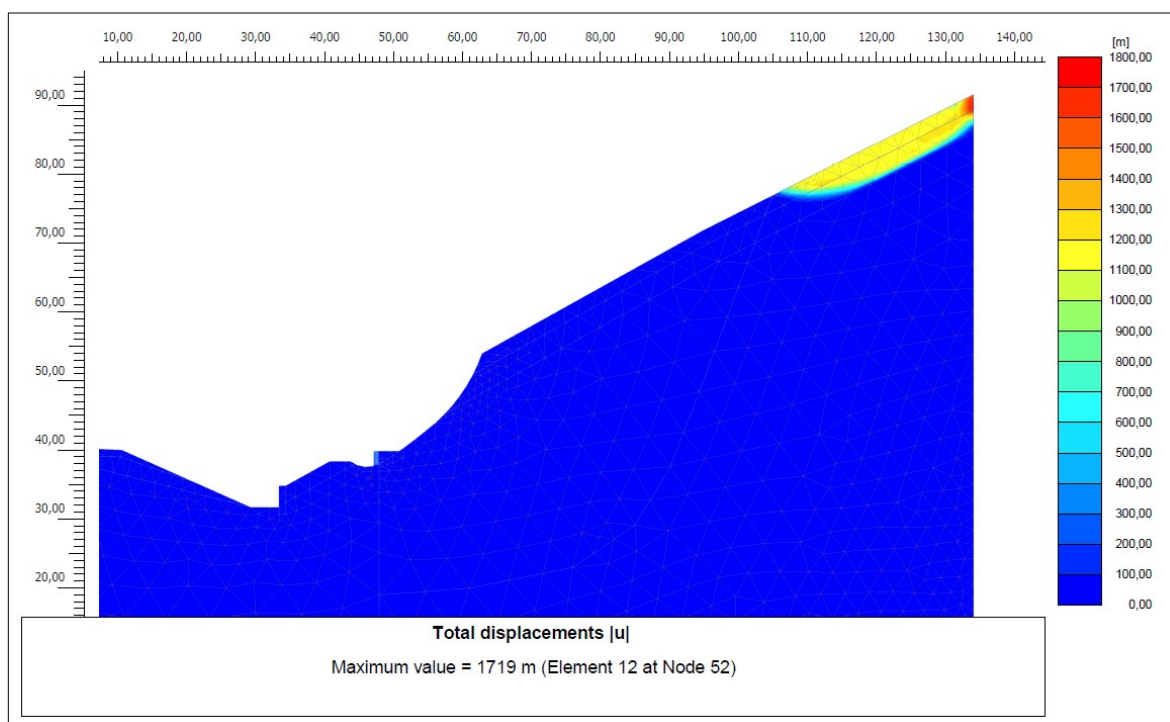
(Slabě vyznačená oblast – lineárně elastický model, středně silně vyznačená oblast – Mohr – Coulombův model, silně vyznačená oblast – soudržnější oblast s působením kotev)

Po provedení výpočtu 2. sanačního návrhu byl zjištěn stupeň stability, který dosahuje hodnoty 1,519. Navržené sanační opatření tedy z hlediska stupně stability vyhovuje pro trvalé stabilní svahy. Z průběhu smykové plochy je patné, že nově vzniklá smyková plocha se nachází v přípovrchové vrstvě, na rozhraní vrstvy pískovce třídy R5 a R4. Je zachycena soudržnou oblastí s horninovými kotvami (Obrázek 37).

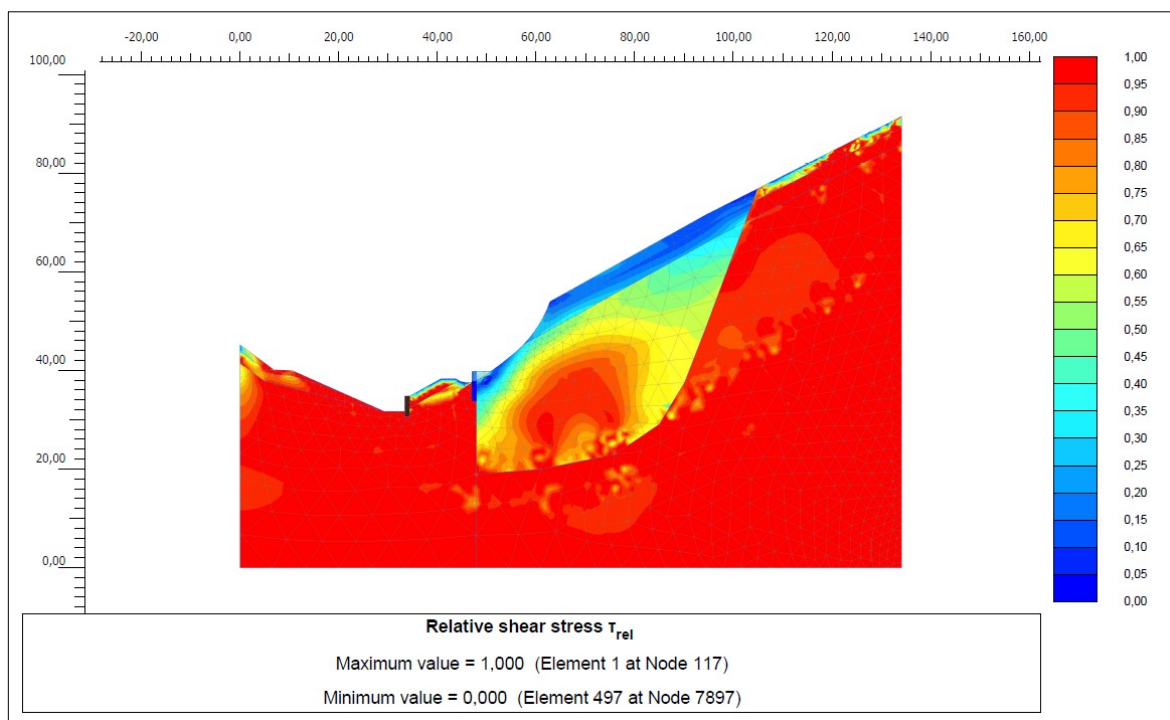
Z dalších modelových výstupu je vidět, že celkové posuny kopírují pohyb s nově vzniklou smykovou plochou na rozhraní vrstev pískovce (Obrázek 36). Smyková pevnost v hornině, která není přímo zasazena kotevními prvky (soudržnější oblastí), je značně snížena. Soudržnější oblast má vysokou hodnotu soudržnosti (Obrázek 38).



Obrázek 37 – Průběh smykové plochy na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]



Obrázek 36 – Celkové posuny na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]



Obrázek 38 – Čerpání smykové pevnosti na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]

7. Porovnání jednotlivých variant sanací

Matematickým modelováním pomocí softwaru PLAXIS 2D byly provedeny stabilitní výpočty navržených sanací. Oba návrhy vyhověly z hlediska stupně stability. Dosahují hodnot větší než 1,5 a proto je lze považovat jako trvale stabilní opatření.

Z konstrukčního hlediska jsou navržené sanace velice podobné, neboť hlavní úlohu ve stabilizaci svahu mají v obou případech horninové pramencové kotvy. Délka kotvy, únosnost a počet pramenců je závislý na sklonu svahu. Z modelů vyplývá, že čím máme sklon sesunutého svahu větší, tím je nutné použít delší kotevní prvky a více pramenců, protože rozhodující smyková plocha se nachází ve větší vzdálenosti od hrany svahu. Přetížení paty svahu zastává v těchto návrzích sekundární funkci, ale přesto důležitou. Zabraňují vytvoření potencionální nové smykové ploše v patě svahu.

Podle technologického postupu se návrhy odlišují. U návrhu č. 1 je nejpracnější a současně nejvíce problematická úprava sklonu svahu. Během provádění této činnosti mohou nastat špatným zásahem další sesuvy. Je nutné dbát při této části výstavby zvýšené opatrnosti. Provádění gabionové stěny nebo horninových kotev patří v dnešní době mezi běžné sanační opatření. Stavební firmy jsou s technologickými postupy těchto konstrukcí dobře seznámeny, proto je riziko jejich provádění menšího měřítka. Ovšem geologická stavba horninového prostředí může být vždy nevyzpytatelná, není proto podmínkou, že tyto práce budou vždy prováděny bez komplikací. Návrh sanace č. 2 je z hlediska technologického postupu náročnější na těžkou stavební techniku. K provedení mikrozáporové stěny je nutná vrtná souprava. Zároveň je k osazení zápor do vrtu potřeba větší přesnosti. Dále horninové kotvy jsou zde navrženy o délce až 32 m, proto je větší požadavek na délku vrtné tyče a soupravy i tady.

Oba sanační návrhy mají své opodstatněné výhody, ale i nevýhody. Výběr návrhu je proto závislý na možnostech stavební firmy, jak po technické stránce, tak po stránce ekonomické. Z hlediska stupně stability vychází přijatelněji návrh sanace č. 1, kde hodnota $M_{sf,1} = 1,571$, kdež to u návrhu sanace č. 2, je hodnota $M_{sf,2} = 1,519$. Obě sanace jsou vyhovující jako trvalé opatření sesunutého svahu. S drobnými konstrukčními úpravami lze tyto dva návrhy mezi sebou kombinovat.

8. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou svahových sesuvů. Popisuje jejich vznik a příčiny těchto nestabilit. Dále se práce zmiňuje o možných sanačních opatřeních, kterými se porušené oblasti stabilizují.

Sesuvné pohyby patří v České republice mezi nejničivější geologické pochody. Flyšové oblasti, kam patří i zájmový sesuv jsou k těmto pochodům velice náchylné. Přispívá k tomu geologická stavba (střídání vrstev jílovců a pískovců) a klimatické podmínky. Moravskoslezské Beskydy jsou součástí flyšového pásma Západních Karpat, které lze zařadit do soustavy geologicky mladých pásemných pohoří, vznikajících koncem druhohor a ve třetihorách působením několika fází alpinského vrásnění.

Cílem práce bylo posouzení konkrétního sesuvu, který se nachází na levém svahu potoka Dolní Rozpítý v Dolní Bečvě. Ke svahovému pohybu došlo v dané lokalitě v únoru – březnu roku 2013. Hlavní příčinou bylo odlesnění svahu. Tím se porušila stabilita, kterou zajišťovala vegetace. V jarním období je navíc v lokalitě zvýšený výskyt srážek a tání sněhové pokrývky. Voda se tudíž vlivem odlesnění neměla kde udržovat. V důsledku těchto příčin se aktivoval sesuv o rozloze 55 x 22 m.

Posouzení sesuvu a návrh sanačního opatření bylo provedeno pomocí matematického modelování v program PLAXIS 2D. Ten pracuje na principu metody konečných prvků. Byly navrženy a posouzeny dvě sanační varianty.

U prvního návrhu byla jako sanace navržena přítěžovací gabionová zeď v patě svahu se šterkovým zásypem, zmenšeným sklonem sesuvu zarovnaném do roviny svahu a jako hlavní stabilizační prvek byly použité horninové pramencové kotvy. Druhý sanační návrh byl podobný. Opět byly hlavním zajišťovacím prvkem pramencové kotvy. Sklon svahu se tentokrát zásadně neměnil, proto kotvy musely být navrženy ve větší délce. V patě svahu byla provedena mikrozáporová zeď a šterkový zásyp.

Obě sanace vykazovaly hodnotu stupně stability větší než 1,5. Z toho vyplývá, že navržená opatření vyhovují z hlediska trvalé stability.



Obrázek 39 – Panoramatická fotografie řešeného svahu [Foto autor]

Seznam použité literatury

Seznam literatury

- [1] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. *Sesuvy a zabezpečování svahů*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Academia, 1987.
- [2] HULLA, Jozef. *Predpoklady a skutočnosť v geotechnickom inžinierstve*. Bratislava: Jaga group, 2002. ISBN 80-88905-42-7.
- [13] MENČÍK, Eduard. *Geologie Moravskoslezských Beskyd a Podbeskydské pahorkatiny*. Praha: Academia, 1983.
- [14] MENČÍK, Eduard a Jaroslav TYRÁČEK (eds.). *Přehledná geologická mapa Beskyd a Podbeskydské pahorkatiny*. Praha: Ústřední ústav geologický, 1985.

Internetové zdroje

- [3] Svahové pohyby. *DocSlide*. [online]. 01.04.2016 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://documents.tips/documents/svahove-pohyby.html>
- [4] Titulní stránka. *Dolní Bečva*. [online]. © 2007 [cit. 2016-09-29]. Dostupné z: <http://www.dolnibecva.cz/>
- [5] Zlín region. *Zlín region in Brussels*. [online]. [2004] [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: http://www.zlinregioninbrussels.eu/zlin_region.php
- [6] Mapy Google. *Google.cz*. [online]. © 2016 [cit. 2016-09-03]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [7] Moravskoslezské Beskydy. *tisícovky čech-moravy-sleszka*. [online]. © 2003-2015 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://www.tisicovsky.cz/cs/hory/moravskoslezske-beskydy/>
- [8] Beskydy. *Treking*. [online]. 20.3.2007 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://www.treking.cz/regiony/beskydy.htm>
- [9] Moravskoslezské Beskydy. *Moravské-Karpaty.cz*. [online]. 18.2.2015 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/geomorfologie/moravskoslezske-beskydy/>

- [10] Geomorfologie. *Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky*. [online]. © 2016 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/geomorfologie/>
- [11] Geologie. *Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky*. [online]. © 2016 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/geologie/>
- [12] Beskydy – geologie. *www.beskydy.cz*. [online]. 16.12.2014 [cit. 2016-08-30]. Dostupné z: <http://informace.beskydy.cz/content/beskydy-informacni-texty-beskydy-geologie.aspx>
- [15] Vodopis. *Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky*. [online]. © 2016 [cit. 2016-09-03]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/vodopis/>
- [16] Podzemní vody moravských Karpat. *Moravské-Karpaty.cz*. [online]. 22.2.2015 [cit. 2016-09-24]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/hydrografie/podzemni-vody/>
- [17] Historická data – územní srážky. *Český hydrometeorologický ústav*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky#>
- [18] Mapové aplikace. *Česká geologická služba*. [online]. © 2016 [cit. 2016-09-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/mapove-aplikace>
- [19] Pevnost hornin. *Fakulta stavební ČVUT v Praze*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/pevnost-hornin.pdf>
- [20] Normové charakteristiky. *Zakladanie stavieb a Inžinierska geológia*. [online]. © 2011 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: http://svf.uniza.sk/kg/zakladanie/Normove_charakteristiky.pdf
- [21] Online nápověda – Parametry hornin. *Fine – civil engeneering software*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/parametry-hornin-01/>
- [22] Základy matematického modelování. *issuu.com*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: https://issuu.com/oktaedr/docs/oktaedr_zaklady_matematickeho_model

- [23] Modelování v geotechnice. *Inovace studijního programu Geotechnika*. [online]. © 2012 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/06-metoda-konecných-prvku.pdf>

- [24] Modelování v geotechnice. *Inovace studijního programu Geotechnika*. [online]. © 2012 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/03-konstitutivní-modelování.pdf>

- [25] Horninové kotvy. *Zakládání staveb*. [online]. © 2008 – 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.zakladani.cz/cz/horninove-kotvy>

- [26] Horninové kotvy pramencové. *Freyssinet – sustainable technology*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://www.freyssinet.cz/211-horninove_kotvy_pramencove

- [27] Mikrozápory, mikropiloty. *Katedra technologie staveb*. [online]. © 2007 – 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://technologie.fsv.cvut.cz/aitom/podklady/online-zakladani/textjama334.html>

- [28] Pažení stavebních jam – mikrozáporové pažení. *Zakládání staveb*. [online]. © 2007 – 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.zakladani.cz/cz/pazeni-stavebnich-jam-mikrozaporove-pazeni>

- [29] Specifikace výrobku. *Ferona*. [online]. © 2004 – 2016 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=29760>

- [30] Tabulka betonu. *Experimentální centrum*. [online]. © 2016 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://ecentrum.fsv.cvut.cz/download/obecne/tridy_betonu.pdf

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 – Hlavní části sesuvu [3]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2 – Základní typy geologicko-tektonických struktur [2]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3 – Druhy smykových ploch [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4 – Půdorysné tvary sesuvů [3]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5 – Letecký snímek obce Dolní Bečva [4]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 6 – Zlínský kraj [5]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 7 – Obec Dolní Bečva s vyznačeným posuzovaným svahem [6]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 8 – Geomorfologie CHKO Beskydy [10]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 – Statigrafické schéma vrstevního sledu Slezské jednotky</i>	
<i>– Godulský vývoj [14]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 – Fotografie řešeného sesunutého svahu [Foto autor]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 11 – Místní komunikace v patě sesuvu [Foto autor]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 12 – Gabionová zeď v úrovni potoka Dolní Rozpítý [Foto autor]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 13 – Vzdálenost nejbližšího vrtu od řešeného svahu [18 – aplikace: vrtná</i>	
<i>prozkoumatelnost]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 14 – Výpis geologické dokumentace objektu KV-1(718477) [Zdroj: ČGS]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 15 – Zaměřený obrys sesuvu</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 16 – Příčný profil zájmového svahu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 17 – Hookův zákon (Lineárně elastický model) [24]</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 18 – Grafické vyjádření Mohr-Coulombovy podmínky porušení a plasticity [24]</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 19 – Iniciační fáze - původní stav svahu</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 20 – 1. fáze - sesunutý stav svahu</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 21 – Průběh smykové plochy na sesunutém stavu svahu [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	
<i>.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 22 – Průběh smykové plochy na původním stavu svahu [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 23 – Celkové posuny na původním stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 24 – Celkové posuny na sesunutém stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 25 – Čerpání smykové pevnosti na původním stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 26 – Čerpání smykové pevnosti na sesunutém stavu svahu [Výstup PLAXIS 2D]</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 27 - Schéma návrhu sanace č. 1</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 28 - Schéma návrhu sanace č. 2</i>	<i>50</i>

<i>Obrázek 29 – Geometrie 1. fáze sanačního návrhu č. 1</i>	53
<i>Obrázek 30 – Geometrie 2. fáze sanačního návrhu č. 1</i>	54
<i>Obrázek 31 – Průběh smykové plochy na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	55
<i>Obrázek 32 – Celkové posuny na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	55
<i>Obrázek 33 – Čerpání smykové pevnosti na sanačním návrhu č. 1 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	56
<i>Obrázek 34 – Geometrie 1. fáze sanačního návrhu č. 2</i>	58
<i>Obrázek 35 – Geometrie 2. fáze sanačního návrhu č. 2</i>	59
<i>Obrázek 36 – Celkové posuny na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	60
<i>Obrázek 37 – Průběh smykové plochy na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	60
<i>Obrázek 38 – Čerpání smykové pevnosti na sanačním návrhu č. 2 [Výstup z PLAXISU 2D]</i>	61
<i>Obrázek 39 – Panoramatická fotografie řešeného svahu [Foto autor]</i>	64

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 – Parametry horninového prostředí dle směrných normových charakteristik</i>	34
<i>Tabulka 2 – Vstupní parametry horninového prostředí a konstrukcí do matematického modelu</i>	51
<i>Tabulka 3 – Výpočet hodnoty soudržnější oblasti návrhu č. 1</i>	53
<i>Tabulka 4 – Výpočet hodnoty soudržnější oblasti návrhu č. 2</i>	57
<i>Tabulka 5 – Hodnoty materiálu mikrozáporové stěny</i>	58